



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII - ARARUNA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE – CCTS
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

JOSÉ LAVÍNIO FORTALEZA DE ALENCAR

**ANÁLISE DA PEGADA HÍDRICA TOTAL EM EMPRESAS DE CONCRETO
USINADO EM CIDADES DA PARAÍBA**

**ARARUNA-PB
2025**

JOSÉ LAVÍNIO FORTALEZA DE ALENCAR

**ANÁLISE DA PEGADA HÍDRICA TOTAL EM EMPRESAS DE CONCRETO
USINADO EM CIDADES DA PARAÍBA**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro.

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A368a Alencar, Jose Lavinio Fortaleza de.

Análise da pegada hídrica total em empresas de concreto usinado em cidades da Paraíba [manuscrito] / Jose Lavinio Fortaleza de Alencar. - 2025.

76 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2025.

"Orientação : Prof. Dra. Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro, Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS".

1. Gestão dos recursos hídricos.. 2. Construção civil.. 3. Sustentabilidade.. 4. Reúso de água.. I. Título

21. ed. CDD 333.91

JOSE LAVINIO FORTALEZA DE ALENCAR

ANÁLISE DA PEGADA HÍDRICA TOTAL EM EMPRESAS DE CONCRETO
USINADO EM CIDADES DA PARAÍBA,

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Engenharia Civil da Universidade
Estadual da Paraíba, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil

Aprovada em: 04/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Simone Danielle Acirole Morais Marinho** (***.645.434-**), em **18/06/2025 17:56:25** com chave **b2a757164c8611f0958f1a1c3150b54b**.
- **Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro** (***.449.194-**), em **18/06/2025 14:58:09** com chave **cb1cbe9e4c6d11f091311a7cc27eb1f9**.
- **Maria Ana Fernandes Matias Nobre** (***.677.584-**), em **18/06/2025 14:59:01** com chave **ea6d2ad64c6d11f08c4b06adb0a3afce**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final

Data da Emissão: 23/06/2025

Código de Autenticação: 131cb9



Aos meus pais, que sempre fizeram de tudo para proporcionar a realização desse sonho, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me dado forças, saúde, sabedoria e perseverança sem Ele nada seria possível.

Agradeço à minha família, em especial ao meu pai, José Lacleide, à minha mãe, Antônia Neusa, e à minha irmã, Maria Nesci, que nunca mediram esforços para me apoiar, oferecendo amor, incentivo e compreensão em todos os momentos.

Aos amigos que fiz ao longo da graduação, em especial Whilame, Matheus, Everlan, Danilo, Michel, Ewerton, Kauã, Rian, Pedro Thiago, Lukas, Railson, Heberthy, Brenilson, Lau, Pedro, Debora, Clara, Iasmim, Nathan, Lucas e Marcos que ao longo da formação, confraternizamos, rimos e estudamos, tornando essa caminhada mais leve.

Agradeço também à Pilares Consultoria Júnior de Engenharia Civil, por ter sido um espaço de crescimento técnico e pessoal que contribuiu imensamente para minha formação.

Às empresas participantes da pesquisa, que gentilmente disponibilizaram seu tempo e suas informações, tornando possível a realização deste estudo, registro minha sincera gratidão.

Aos professores da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), pelo conhecimento transmitido, pelo apoio acadêmico e pelo compromisso com a formação de engenheiros civis de excelência.

À minha orientadora, Adriana Ribeiro, agradeço profundamente pela paciência, dedicação, incentivo e pelas valiosas orientações ao longo deste trabalho.

Agradeço ainda à professora Simone Aciole e Maria Ana, que compuseram minha banca avaliadora, pelas contribuições e sugestões que enriqueceram este trabalho.

Agradeço à UEPB, instituição que acolheu minha formação e me proporcionou uma trajetória acadêmica repleta de desafios, aprendizados e conquistas

E, por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste ciclo. Muito obrigado!

“O meio ambiente é patrimônio da humanidade e sua defesa é dever de todos.”

Constituição Federal do Brasil, Art. 225.

RESUMO

A crescente pressão sobre os recursos hídricos, impulsionada pelo aumento da demanda em setores como a construção civil, evidencia a necessidade de avaliar e racionalizar o uso da água. O setor da construção é reconhecido por seu elevado consumo de água e geração de impactos ambientais, sendo o concreto usinado um dos materiais com maior demanda hídrica ao longo de sua produção. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a pegada hídrica total, compreendendo as componentes azul, verde e cinza, em empresas produtoras de concreto usinado, visando identificar as fontes de consumo e oportunidades de redução. A pesquisa foi realizada coletando os dados referentes ao ano de 2024 em quatro empresas localizadas nas cidades de Campina Grande, João Pessoa e Cabedelo, no estado da Paraíba. Os dados foram obtidos por meio de questionários estruturados e analisados conforme a metodologia proposta por Hoekstra et al. (2011), que permite mensurar a pegada hídrica a partir do volume de água doce utilizada nas diferentes etapas produtivas. Os resultados demonstraram que, devido à indisponibilidade de dados sobre a umidade dos agregados e o destino da água residual, apenas a componente azul pôde ser quantificada com segurança, sendo considerada representativa para os fins deste estudo. A análise revelou práticas positivas, como o reúso parcial da água de lavagem, mas também evidenciou lacunas como a ausência de captação de águas pluviais e de metas de gestão hídrica. O estudo reforça a importância de se adotar tecnologias acessíveis e práticas sustentáveis para reduzir a pressão sobre os recursos hídricos no setor da construção.

Palavras-Chave: Gestão dos recursos hídricos. Construção civil. Sustentabilidade. Reúso de água.

ABSTRACT

The growing pressure on water resources, driven by increasing demand in sectors such as civil construction, highlights the need to assess and rationalize water use. The construction sector is known for its high water consumption and environmental impacts, with ready-mix concrete being one of the materials with the highest water demand throughout its production process. In this context, this study aims to analyze the total water Footprint, including its blue, green, and grey components, in ready-mix concrete companies, in order to identify the main sources of consumption and opportunities for reduction. The research was conducted using data from 2024, collected from four companies located in the cities of Campina Grande, João Pessoa, and Cabedelo, in the state of Paraíba, Brazil. The data were obtained through structured questionnaires and analyzed using the methodology proposed by Hoekstra et al. (2011), which enables the measurement of the water footprint based on the volume of freshwater used in different production stages. The results showed that, due to the unavailability of data on aggregate moisture and the destination of residual water, only the blue component could be reliably quantified and was considered representative for the purposes of this study. The analysis revealed positive practices, such as partial reuse of washing water, but also highlighted gaps such as the absence of rainwater harvesting systems and internal water management goals. The study reinforces the importance of adopting accessible technologies and sustainable practices to reduce pressure on water resources in the construction sector.

Keywords: Water resources management. Civil construction. Sustainability. Water reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Distribuição da água mundo.....	19
Figura 2 –	Escassez de água no mundo.....	21
Figura 3 –	Regiões Hidrográficas (RHs) brasileiras.....	22
Figura 4 –	Relação entre disponibilidade hídrica e demanda de água.....	23
Figura 5 –	Índices De Perdas Na Distribuição De Água.....	25
Figura 6 –	Precipitação anual no País (média de 1961 a 2007)	26
Figura 7 –	Demandas de uso da água no Brasil em 2017.....	30
Figura 8 –	Componentes da uma pegada hídrica.....	32
Figura 9 –	Quatro fases distintas na avaliação da pegada hídrica.....	33
Figura 10 –	Esquematização do sistema de produção do produto “p” em “k” passos de processo.....	37
Figura 11 –	Fluxograma do processo de produção do concreto usinado.....	41
Figura 12 –	Fases de execução da pegada hídrica neste estudo.....	51
Figura 13 –	Delimitação do estado da Paraíba.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Relação entre a disponibilidade de água e a população em porcentagem.....	20
Tabela 2 –	Distribuição percentual dos recursos hídricos brasileiros por suas regiões.....	23
Tabela 3 –	Instrumentos de coleta de dados utilizados na pesquisa.....	55
Tabela 4 –	Caracterização das empresas participantes.....	61
Tabela 5 –	Pegada hídrica azul por empresa.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CBCS	Conselho Brasileiro De Construção Sustentável
CBHSF	Comitê Da Bacia Hidrográfica Do Rio São Francisco
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IAT	Instituto Água e Terra
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
PBMC	Painel Brasileiro De Mudanças Climáticas
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura
WRI	World Resources Institute
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

LISTA DE SÍMBOLOS

\$	Dólar
%	Porcentagem
£	Libra
¥	Iene
€	Euro
§	Seção
©	Copyright
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo Geral.....	17
1.2	Objetivos Específicos.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Água como Recurso Hídrico	18
2.1.1	<i>Disponibilidade hídrica no mundo.....</i>	19
2.1.2	<i>Disponibilidade hídrica no Brasil.....</i>	21
2.1.3	<i>Contexto Regional: Paraíba.....</i>	25
2.2	Dinâmica de Uso e Consumo dos Recursos Hídricos.....	28
2.2.1	<i>Panorama do consumo hídrico no Brasil.....</i>	29
2.3	Pegada Hídrica.....	31
2.3.1	<i>Metodologia de Cálculo da Pegada Hídrica.....</i>	33
2.3.2	<i>Cálculo da Pegada Hídrica: Azul, Verde e Cinza.....</i>	34
2.3.3	<i>Cálculo da Pegada Hídrica de um Produto.....</i>	36
2.3.4	<i>Aplicações Práticas da Pegada Hídrica.....</i>	38
2.3.5	<i>Limitações e Desafios da Pegada Hídrica.....</i>	39
2.4	Produção de Concreto Usinado e suas Demandas Hídrica.....	41
2.4.1	<i>Visão Geral do Processo de Produção de Concreto Usinado.....</i>	41
2.4.2	<i>Etapas do Processo com Uso de Água.....</i>	42
2.4.3	<i>Fontes de Abastecimento Hídrico nas Usinas de Concreto.....</i>	43
2.4.4	<i>Pontos Críticos de Consumo de Água.....</i>	44
2.4.5	<i>Impactos da Produção na Pegada Hídrica.....</i>	45
2.5	Estratégias para Redução do Consumo de Água.....	46
2.5.1	<i>Reúso e Reciclagem da Água nas Usinas de Concreto.....</i>	46
2.5.2	<i>Captação de Água da Chuva.....</i>	47
2.5.3	<i>Tecnologias de Eficiência Hídrica no Processo Produtivo.....</i>	48
2.5.4	<i>Concretos com Menor Demanda Hídrica.....</i>	49
3	METODOLOGIA	51
3.1	Tipo De Pesquisa.....	51
3.2	Delimitação do Estudo.....	52
3.3	População e Amostra.....	53

3.4	Coleta de Dados.....	54
3.5	Instrumentos de Análise.....	55
3.6	Procedimentos para Cálculo da Pegada Hídrica.....	56
3.7	Técnicas de Comparação e Avaliação.....	58
3.8	Avaliar Estratégias de Redução.....	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	Caracterização das Empresas Participantes.....	61
4.2	Quantificação da Pegada Hídrica Total.....	62
4.3	Análise das Práticas de Gestão Hídrica.....	63
4.4	Comparação com Estudos Anteriores.....	65
4.5	Discussão sobre Oportunidades de Redução.....	66
5	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A – FORMULÁRIO DE COLETA DE DADOS.....	73

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável para a vida no planeta e para o desenvolvimento das atividades humanas. Entretanto, o uso desenfreado e muitas vezes irracional desse recurso tem gerado preocupações significativas em relação à sua disponibilidade e qualidade. A crescente demanda por água, impulsionada pelo aumento populacional, industrialização e urbanização, exerce uma pressão sem precedentes sobre os recursos hídricos, resultando em sérias consequências ambientais, sociais e econômicas (UNESCO, 2024). Entre essas consequências estão a escassez de água potável, a degradação de ecossistemas, a perda de biodiversidade e a intensificação de conflitos por recursos hídricos.

O consumo de água doce aumentou em 6 vezes no último século e continua a avançar a uma taxa de 1% ao ano, fruto do crescimento populacional, do desenvolvimento econômico e das alterações nos padrões de consumo. A qualidade do bem diminuiu exponencialmente e o estresse hídrico, mensurado essencialmente pela disponibilidade em função do suprimento, já afeta mais de 2 bilhões de pessoas. Muitas regiões enfrentam a chamada escassez econômica da água: ela está fisicamente disponível, mas não há a infraestrutura necessária para o acesso. E isso em um horizonte cuja previsão de crescimento no consumo é de quase 25% até 2030. (UNESCO, 2021).

Segundo Pereira (2019), o crescimento populacional impulsiona diretamente o aumento das atividades da construção civil, setor reconhecido como um dos mais impactantes ao meio ambiente devido à sua atuação em todo o ciclo de vida das edificações. Ressalta-se ainda que o segmento de edifícios assume especial relevância por articular simultaneamente as três dimensões da sustentabilidade: ambiental, social e econômica. Esse setor é responsável por um consumo significativo de recursos naturais.

De acordo com dados do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2021), consome entre 40% e 75% dos recursos naturais extraídos do planeta e é responsável por cerca de 30% do lixo sólido gerado. Tais números ressaltam a importância de adotar práticas mais sustentáveis e eficientes no uso de recursos hídricos dentro da construção civil, especialmente em setores como o de concreto usinado, que demandam grandes volumes de água em suas operações.

A realização desta pesquisa sobre a pegada hídrica em empresas de concreto usinado em cidades na Paraíba é fundamental devido à crescente pressão sobre os recursos hídricos e a necessidade de sustentabilidade na construção civil. O tema é extremamente relevante, pois o setor da construção civil, responsável por uma parcela significativa do consumo de água tratada e de recursos naturais, tem um impacto direto na disponibilidade e qualidade da água. Ao focar na análise da pegada hídrica em empresas de concreto usinado, este estudo busca identificar e quantificar o consumo de água nesse segmento, propondo soluções para a redução do uso desse recurso vital. A pesquisa pretende contribuir para a construção de práticas mais sustentáveis e eficientes, essenciais para mitigar os impactos ambientais e promover o desenvolvimento sustentável na região.

Além da importância ambiental, o tema se justifica por sua relevância econômica e social, especialmente em regiões semiáridas como a Paraíba, que enfrentam escassez de água. A pesquisa contribui cientificamente ao fornecer dados que podem embasar políticas públicas e práticas privadas voltadas à sustentabilidade hídrica. Ao tratar da pegada hídrica na construção civil, também aponta oportunidades de redução de custos operacionais e incentivo à conscientização ambiental no setor.

A crescente demanda por recursos naturais na construção civil, especialmente a água, coloca em evidência a necessidade de práticas mais sustentáveis e eficientes. No contexto das empresas de concreto usinado em cidades da Paraíba, a questão central a ser resolvida nesta pesquisa é: Quais são as principais fontes de consumo hídrico e oportunidades de redução da pegada hídrica em empresas de concreto usinado na Paraíba, com base em dados disponíveis e práticas setoriais?

Para responder a essa questão, a pesquisa analisou as fontes de consumo hídrico e as oportunidades de redução da pegada hídrica em empresas de concreto usinado na Paraíba, com base em dados operacionais do setor. O estudo parte da premissa de que a identificação de padrões de consumo e a adaptação de práticas já consolidadas em outras regiões podem oferecer soluções viáveis para a realidade local. Dessa forma, a pesquisa visa gerar um diagnóstico aplicável não apenas ao contexto paraibano, mas também a outros cenários com desafios similares na construção civil.

1.1 Objetivo Geral

Analisar a pegada hídrica de empresas de concreto usinado na Paraíba, identificando fontes de consumo e estratégias para sua redução com base em dados operacionais do setor.

1.2 Objetivos Específicos

- Mapear a pegada hídrica total, com base nas componentes azul, verde e cinza, para as empresas de concreto usinado estudadas;
- Comparar o consumo de água entre diferentes empresas com base em dados disponíveis;
- Identificar oportunidades de reutilização e reciclagem de água a partir de casos práticos ou literatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A gestão sustentável dos recursos hídricos tornou-se um imperativo global diante do crescimento populacional, da urbanização acelerada e das demandas crescentes por desenvolvimento econômico. No contexto da construção civil, setor responsável por uma significativa parcela do consumo de água e recursos naturais, a avaliação da pegada hídrica emerge como uma ferramenta essencial para mitigar os impactos ambientais e promover práticas mais eficientes e sustentáveis.

Esta seção visa explorar os fundamentos teóricos e metodológicos relacionados à pegada hídrica, contextualizando sua aplicação específica nas empresas de construção civil. A revisão abrange desde os conceitos básicos da pegada hídrica até as técnicas avançadas de gestão hídrica na construção civil, proporcionando uma base sólida para a compreensão dos desafios e das oportunidades associadas à redução do consumo de água nesse setor essencial para o desenvolvimento regional e sustentável.

2.1 Água como Recurso Hídrico

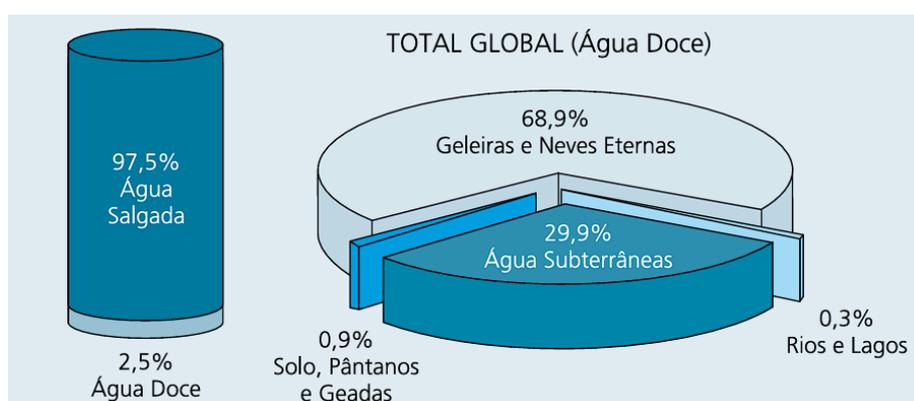
A água é um elemento essencial para a manutenção da vida e o desenvolvimento das atividades humanas, desempenhando papel fundamental em setores como a agricultura, a indústria e o abastecimento urbano. Apesar de cobrir cerca de 71% da superfície terrestre, apenas uma pequena fração desse volume é constituída por água doce disponível para consumo, o que a torna um recurso natural limitado e estratégico. Diante do crescimento populacional, da expansão industrial e das mudanças climáticas, a gestão sustentável dos recursos hídricos tem se tornado um desafio global, exigindo análises críticas sobre sua disponibilidade, distribuição e uso racional.

Nesse contexto, compreender a dinâmica da água como recurso hídrico é essencial para embasar estudos sobre eficiência no consumo, como a pegada hídrica, especialmente em setores intensivos no uso desse insumo, como a produção de concreto usinado. Este tópico abordará a disponibilidade hídrica em escala mundial e nacional, bem como os padrões de uso e consumo, fornecendo subsídios para a análise da sustentabilidade no manejo desse recurso pelas empresas do ramo na Paraíba.

2.1.1 Disponibilidade hídrica no mundo

A água é um recurso essencial para a vida e para as atividades humanas, mas sua distribuição no planeta é extremamente desigual. Conforme ilustrado na FIGURA 1, apenas 2,5% da água total do mundo é doce, enquanto os 97,5% restantes são compostos por água salgada, presente principalmente nos oceanos. Essa pequena porcentagem de água doce, no entanto, não está toda disponível para consumo direto, como evidenciam os dados apresentados a seguir.

FIGURA 1 – Distribuição da água mundo



Fonte: Brito *et al.* (2007)

Dos 2,5% de água doce, a maior parte está concentrada em geleiras e neves eternas (68,9%), que, embora representem um importante reservatório, não são facilmente acessíveis para uso humano. As águas subterrâneas, por sua vez, correspondem a 29,9% do total, sendo uma fonte crítica para abastecimento, especialmente em regiões com escassez de recursos superficiais. Já os rios e lagos, que são as fontes mais visíveis e imediatas de água doce, representam apenas 0,3% do total, destacando a fragilidade desses ecossistemas frente à demanda crescente.

Os demais 0,9% estão distribuídos no solo, pântanos e geadas, desempenhando papéis ecológicos fundamentais, como a regulação do ciclo hidrológico e a manutenção de biodiversidade. Esses dados reforçam a necessidade de políticas de gestão sustentável dos recursos hídricos, visto que a água disponível para consumo direto é uma fração mínima do total.

No contexto de água doce a Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº 357 de 2005, a água doce é classificada como aquela com salinidade igual ou inferior a 0,5‰ (500 mg L⁻¹), diferenciando-se de águas salobras (0,5‰ a 30‰) e salinas (acima de 30‰). Ressalta-se, ainda, que a definição de água doce não se confunde com a de água potável, uma vez que os padrões de qualidade variam conforme o uso, como abastecimento humano, irrigação ou produção de energia. (Brasil, 2005).

A distribuição dos recursos hídricos no planeta apresenta marcantes desigualdades quando comparada à distribuição populacional, conforme a TABELA 1.

Tabela 1 – Relação entre a disponibilidade de água e a população em porcentagem

Continentes	Água (%)	População (%)
América do Norte e Central	15	8
América do Sul	26	6
Europa	8	13
África	11	13
Asia	36	60
Austrália e Oceania	5	1

Fonte: Unesco (2004)

Os dados revelam que a Ásia, por exemplo, concentra 60% da população mundial, mas detém apenas 36% da água doce disponível, evidenciando uma pressão significativa sobre os recursos hídricos na região (UNESCO, 2004). Esse desequilíbrio pode agravar crises de abastecimento, especialmente em áreas com alta densidade demográfica e gestão hídrica ineficiente.

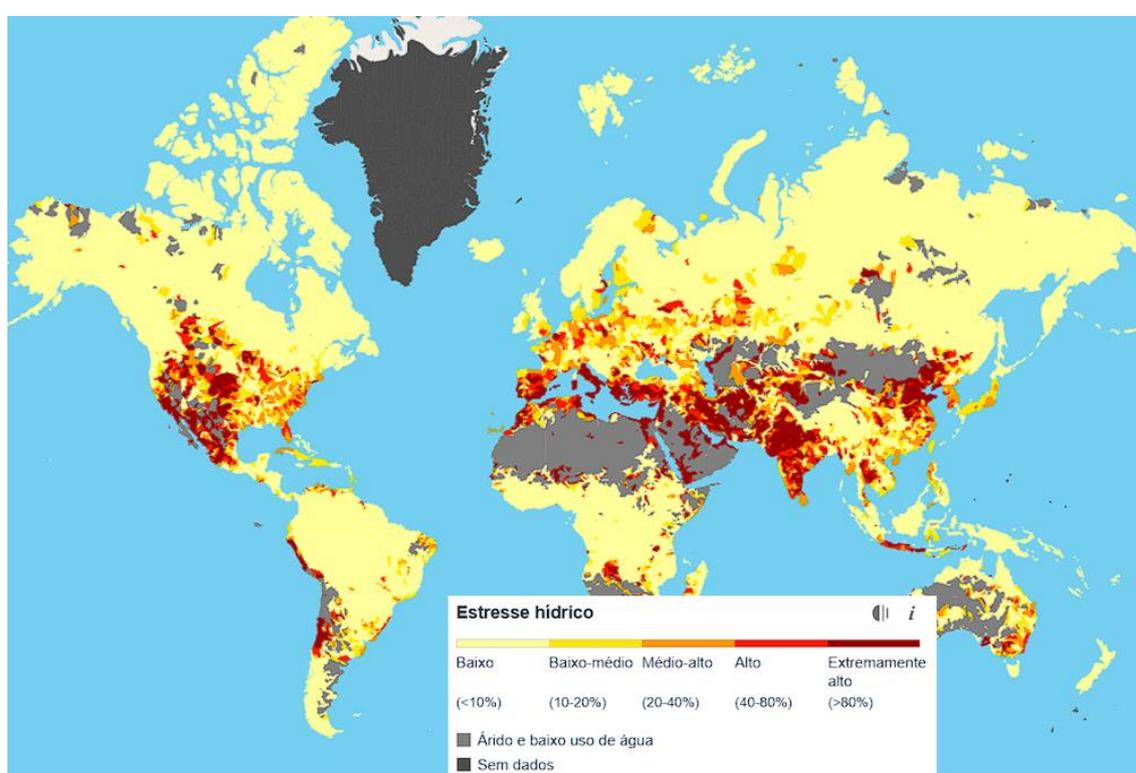
Em contraste, a América do Sul possui 26% da água global, mas apenas 6% da população, destacando-se como uma região com relativa abundância hídrica. Essa disponibilidade, no entanto, não é uniforme dentro do continente, pois fatores como distribuição geográfica, clima e infraestrutura influenciam o acesso real à água. Já a Europa, com 8% da água e 13% da população, e a África, com 11% da água e 13% da população, apresentam desafios distintos: enquanto a Europa prioriza a gestão eficiente devido à sua densidade populacional, a África enfrenta escassez agravada por condições climáticas e limitações econômicas.

Os extremos são representados pela Austrália e Oceania, que, com 5% da água e apenas 1% da população, têm uma relação favorável, mas enfrentam desafios

como a salinização e a variabilidade climática. Por outro lado, a América do Norte e Central apresentam uma proporção equilibrada (15% da água para 8% da população), embora regiões áridas e o uso intensivo na agricultura possam gerar tensões locais. A segurança hídrica depende não apenas da disponibilidade natural, mas também de estratégias sustentáveis de gestão.

O mapa de estresse hídrico (FIGURA 2) revela que nenhuma região está imune a desafios relacionados à água, que variam desde tensões moderadas até crises extremas.

Figura 2 – Escassez de água no mundo



Fonte: WRI (2025)

De acordo com o *Aqueduct: Atlas de Risco Hídrico* do World Resources Institute (WRI, 2025), a escassez de água é um problema que afeta todos os continentes, embora de formas distintas, devido à má distribuição natural dos recursos e a padrões insustentáveis de consumo.

2.1.2 Disponibilidade hídrica no Brasil

O Brasil é frequentemente associado à abundância de recursos hídricos, concentrando aproximadamente 12% da água doce superficial disponível no planeta

(ANA, 2023). O Brasil é dividido em 12 grandes bacias hidrográficas (FIGURA 3), dentre as quais se destacam a Bacia Amazônica, como a mais extensa, e a Bacia do Rio São Francisco, de grande importância para a região Nordeste. Esta última desempenha um papel estratégico no abastecimento humano, na irrigação agrícola e na geração de energia. No entanto, de acordo com o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF, 2016), a bacia enfrenta sérios desafios, como a redução da vazão natural dos rios, provocada pelo desmatamento nas áreas de nascente, pela ocupação irregular do solo e pelo uso intensivo da água em múltiplas atividades.

Já a Bacia do Paraná, que se estende por partes das regiões Sudeste e Sul, sofre com a poluição resultante de atividades industriais e do uso excessivo de fertilizantes e agrotóxicos na agricultura, o que compromete significativamente a qualidade da água, conforme aponta o Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos do Estado do Paraná (IAT, 2020).

Figura 3 - Regiões hidrográficas (Bhs) brasileiras



Fonte: ANA (2013)

No entanto, essa disponibilidade não é uniformemente distribuída em seu território, o que resulta em desafios regionais distintos. A TABELA 2 permite verificar que a região Norte, por exemplo, detém cerca de 68,5% da água doce do país, enquanto abriga apenas 8,3% da população brasileira. Em contraste, o Nordeste, com

27,8% da população, possui apenas 3,3% dos recursos hídricos nacionais, evidenciando uma disparidade crítica (Trata Brasil 2018). Essa desigualdade é agravada por fatores climáticos, como a irregularidade das chuvas no semiárido, e por questões socioeconômicas, como a falta de infraestrutura para armazenamento e distribuição.

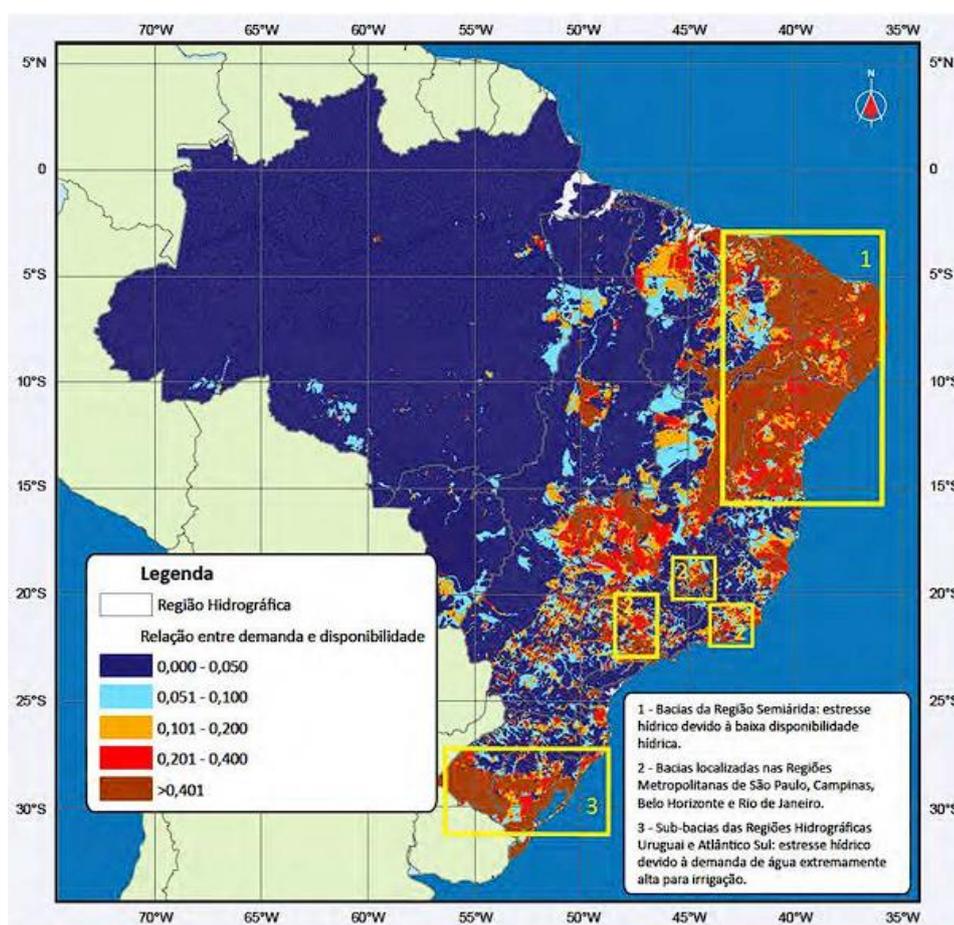
Tabela 2: Distribuição percentual dos recursos hídricos brasileiros por suas regiões

Região	Disponibilidade de Água Doce (%)	População Brasileira (%)
Norte	68,5%	8,3%
Nordeste	3,3%	27,8%
Sudeste	6,0%	42,0%
Sul	6,5%	14,3%
Centro-Oeste	15,7%	7,6%

Adaptada pelo autor

Fonte: Instituto Trata Brasil (2018)

Figura 4 - Relação entre disponibilidade hídrica e demanda de água



Fonte: ANA (2013)

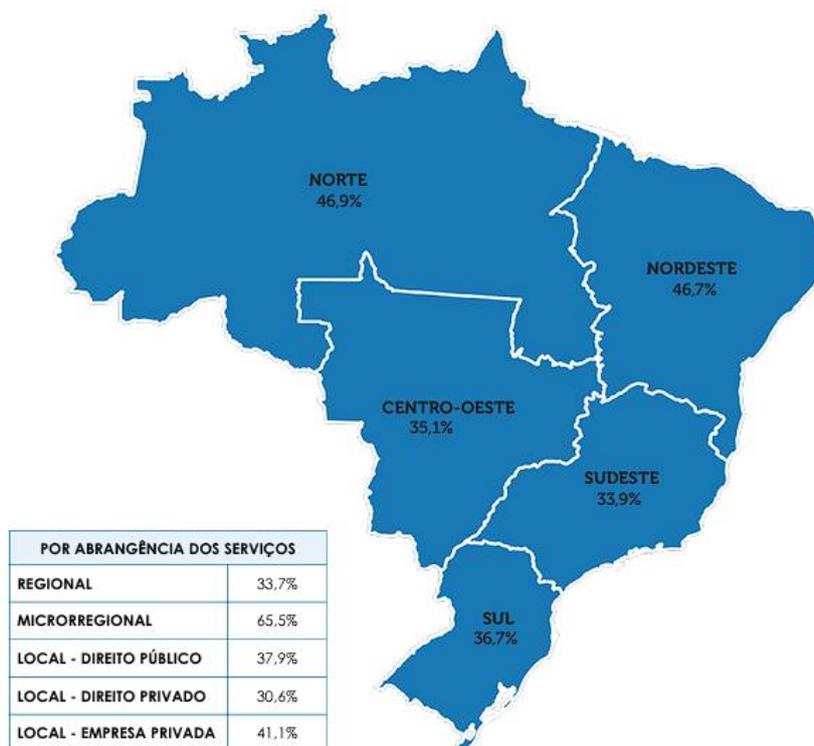
A FIGURA 4 ilustra a relação entre demanda e disponibilidade hídrica nas diversas regiões hidrográficas do Brasil, destacando áreas em situação de estresse hídrico. Observa-se que as regiões com maior densidade populacional e atividade econômica, como o Sudeste e parte do Sul, apresentam índices mais elevados de pressão sobre os recursos hídricos, refletidos pelas cores alaranjadas e vermelhas no mapa.

O destaque para a Região Semiárida (área 1), que inclui grande parte do Nordeste e o estado da Paraíba, evidencia uma situação crítica, em que a baixa disponibilidade de água aliada à elevada demanda resulta em um cenário de forte estresse hídrico. Essa condição reforça a urgência na adoção de medidas de uso racional da água, especialmente em setores como a construção civil, que demandam grandes volumes desse recurso.

Além disso, o mapa também revela que o estresse hídrico não se limita às áreas naturalmente mais secas, atingindo também regiões metropolitanas (área 2) e zonas agrícolas com alta demanda de irrigação (área 3), o que demonstra que a escassez está relacionada tanto à oferta limitada quanto ao uso intensivo e, muitas vezes, ineficiente dos recursos hídricos.

Além das desigualdades naturais na distribuição dos recursos hídricos, o Brasil enfrenta um grave problema relacionado às perdas no sistema de abastecimento público. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), o índice médio de perdas na distribuição de água potável no país é de aproximadamente 37,8%, o que significa que a cada 100 litros de água tratada, mais de 37,8 litros não chegam ao consumidor final. Esses valores variam entre as regiões, mas tendem a ser ainda mais críticos em áreas com infraestrutura precária, como em muitos municípios do Nordeste. Esse alto índice de perdas reflete falhas estruturais no sistema de transporte e distribuição, além de má gestão operacional, agravando ainda mais o cenário de escassez. A FIGURA 5 apresenta o índice de perdas por região.

Figura 5 - Índices de perdas na distribuição de água



Fonte: SNIS (2022)

Segundo o ITB (2022), se as perdas fossem reduzidas à média de países desenvolvidos (em torno de 15%), seria possível abastecer cerca de 60 milhões de brasileiros a mais diariamente, número superior à população total das regiões Norte e Nordeste somadas. Essa realidade reforça que a crise hídrica brasileira é tanto quantitativa quanto qualitativa e está diretamente ligada à eficiência da gestão hídrica no país.

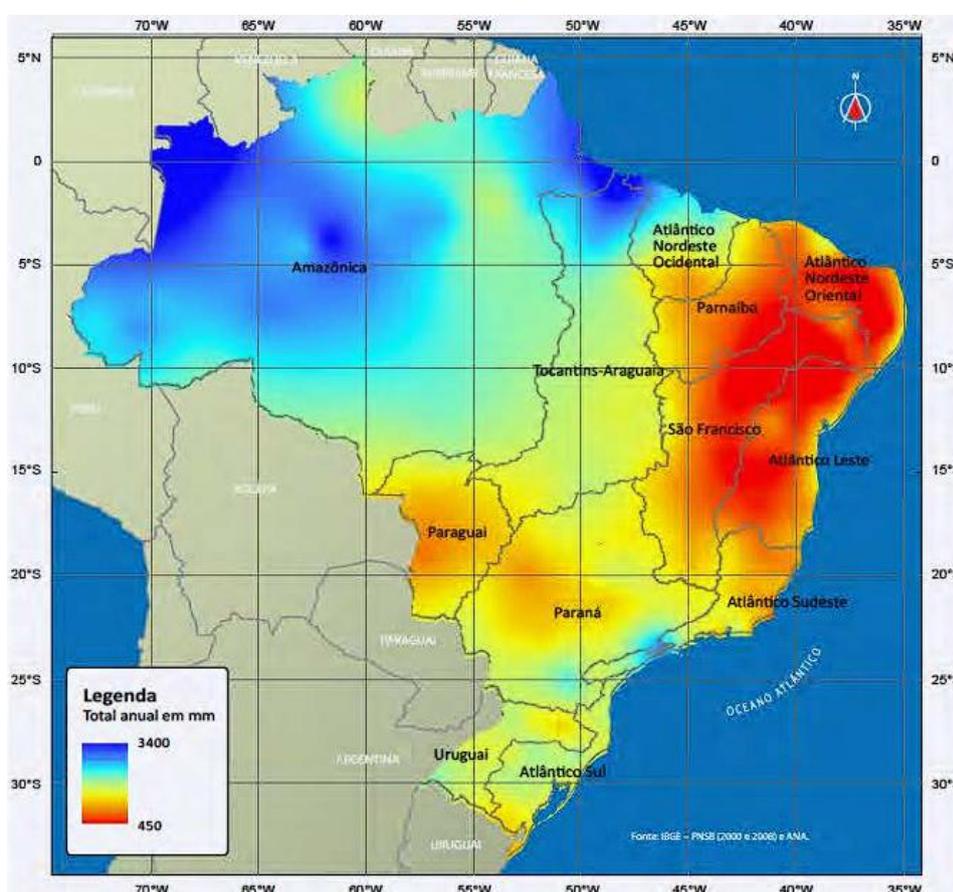
2.1.3 Contexto Regional: Paraíba

A Paraíba, localizada na Região Nordeste do Brasil, possui características ambientais e demográficas que influenciam diretamente a gestão dos recursos hídricos. O estado conta com 223 municípios e uma população urbana de aproximadamente 3,2 milhões de habitantes. A maior parte das sedes urbanas possui baixo contingente populacional, sendo que 95% dos municípios têm menos de 30 mil habitantes. Apenas as cidades de João Pessoa (capital), Patos, Santa Rita e Campina Grande apresentam população superior a 100 mil habitantes, enquanto outras sedes

urbanas, como Mamanguape, Sapé, Cajazeiras, Guarabira, Sousa, Cabedelo e Bayeux, têm população entre 30 e 80 mil habitantes (ANA, 2021).

O estado da Paraíba está inserido no contexto semiárido brasileiro, onde predomina o clima quente e seco, com temperaturas elevadas ao longo do ano e baixa precipitação média anual, variando em torno de 500 mm (FIGURA 6). Essa característica coloca a Paraíba entre as regiões de maior vulnerabilidade hídrica do país, com longos períodos de estiagem e chuvas mal distribuídas, especialmente no sertão e no agreste. A distribuição irregular das chuvas e a alta taxa de evaporação intensificam a escassez de água em muitas localidades (ANA, 2013).

Figura 6 - Precipitação anual no País (média de 1961 a 2007)



Fonte: ANA (2013)

Além dos desafios atuais, projeções climáticas indicam um agravamento desse cenário nas próximas décadas. Segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), espera-se um aumento da temperatura entre 0,5°C e 1°C até 2040, acompanhado por uma redução de 10% a 20% na precipitação. Esse quadro tende a

se agravar nas décadas seguintes, podendo resultar em um aumento da temperatura entre 3,5°C e 4,5°C até o final do século, além da diminuição de até 50% nos padrões de chuva. Tais mudanças climáticas podem acelerar o processo de desertificação da Caatinga, impactando diretamente a disponibilidade hídrica e o equilíbrio ambiental na Paraíba (PBMC, 2013).

Os recursos hídricos superficiais são a principal fonte de abastecimento para cerca de 61% da população urbana do estado, distribuída em 181 municípios. Entre os rios mais significativos para o abastecimento destacam-se o Rio Gramame, o Rio Paraíba e o Rio Piranhas, que integram os principais sistemas integrados da Paraíba (ANA, 2021).

A Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) é responsável por atender 199 municípios, o que representa 89% das sedes urbanas, abrangendo aproximadamente 3,1 milhões de habitantes. A gestão hídrica no estado se apoia em sistemas integrados e adutoras que captam água de reservatórios estratégicos, como o Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), o Açude Acauã e o Açude Coremas. Apesar dos esforços para garantir o abastecimento, grande parte dos mananciais apresenta algum nível de vulnerabilidade. Cerca de 71% das sedes urbanas possuem mananciais considerados vulneráveis, sendo que 39 localidades estão em situação de alta vulnerabilidade hídrica. Essa condição afeta diretamente cerca de 2,2 milhões de habitantes, concentrando-se principalmente nas cidades de Bayeux, Santa Rita e João Pessoa (ANA, 2021).

Além das questões estruturais relacionadas à gestão dos mananciais, a Paraíba enfrenta limitações na cobertura dos sistemas de abastecimento. Embora o índice médio de cobertura seja superior a 95%, aproximadamente 141.796 habitantes ainda não são atendidos pelos serviços de distribuição de água. Algumas localidades, especialmente aquelas com menos de 15 mil habitantes, dependem de sistemas isolados ou operadores locais para garantir o fornecimento hídrico, o que compromete a regularidade do abastecimento em períodos críticos de seca (ANA, 2021).

Diante desse cenário, as perspectivas para as próximas décadas são preocupantes. As mudanças climáticas projetadas pelo Painel Brasileiro De Mudanças Climáticas (PBMC), indicam não só o aumento da aridez, mas também a intensificação de eventos extremos, como secas mais prolongadas e escassez hídrica severa. Isso reforça a necessidade de políticas públicas mais robustas e estratégias que incluam práticas de reutilização da água, captação de chuva e gestão integrada dos recursos

hídricos. Assim, compreender a realidade hídrica da Paraíba é essencial para promover estratégias sustentáveis de uso da água.

2.2 Dinâmica de Uso e Consumo dos Recursos Hídricos

A água é um recurso essencial para o desenvolvimento socioeconômico, desempenhando um papel fundamental em diversas atividades humanas. À medida que a população mundial cresce, a demanda por recursos hídricos também aumenta significativamente. O aumento da população e a intensificação das atividades produtivas contribuem para a elevação do consumo de água, colocando desafios adicionais para regiões que já enfrentam escassez hídrica.

O uso dos recursos hídricos é dividido em categorias consuntivas e não consuntivas. Os usos consuntivos são aqueles em que a água retirada é efetivamente consumida, como no abastecimento urbano, na irrigação agrícola e na produção industrial, já os usos não consuntivos envolvem atividades que utilizam a água sem reduzir significativamente sua quantidade ou qualidade, como a geração de energia hidrelétrica e navegação (ANA 2021).

O uso da água no mundo está fortemente concentrado na agricultura, que responde por cerca de 69% das retiradas globais, principalmente destinadas à irrigação, mas também englobando a dessedentação animal e a aquicultura. Em países em desenvolvimento, essa proporção pode alcançar até 95%, evidenciando a dependência da água para sustentar atividades agrícolas. A indústria, que inclui tanto o uso direto quanto a geração de energia, corresponde a aproximadamente 19% do consumo global, enquanto os municípios utilizam cerca de 12% para abastecimento urbano e atividades domésticas. Essa distribuição reflete a predominância do setor agrícola no uso hídrico, especialmente em regiões menos industrializadas (UNESCO, 2021).

2.2.1 Panorama do consumo hídrico no Brasil

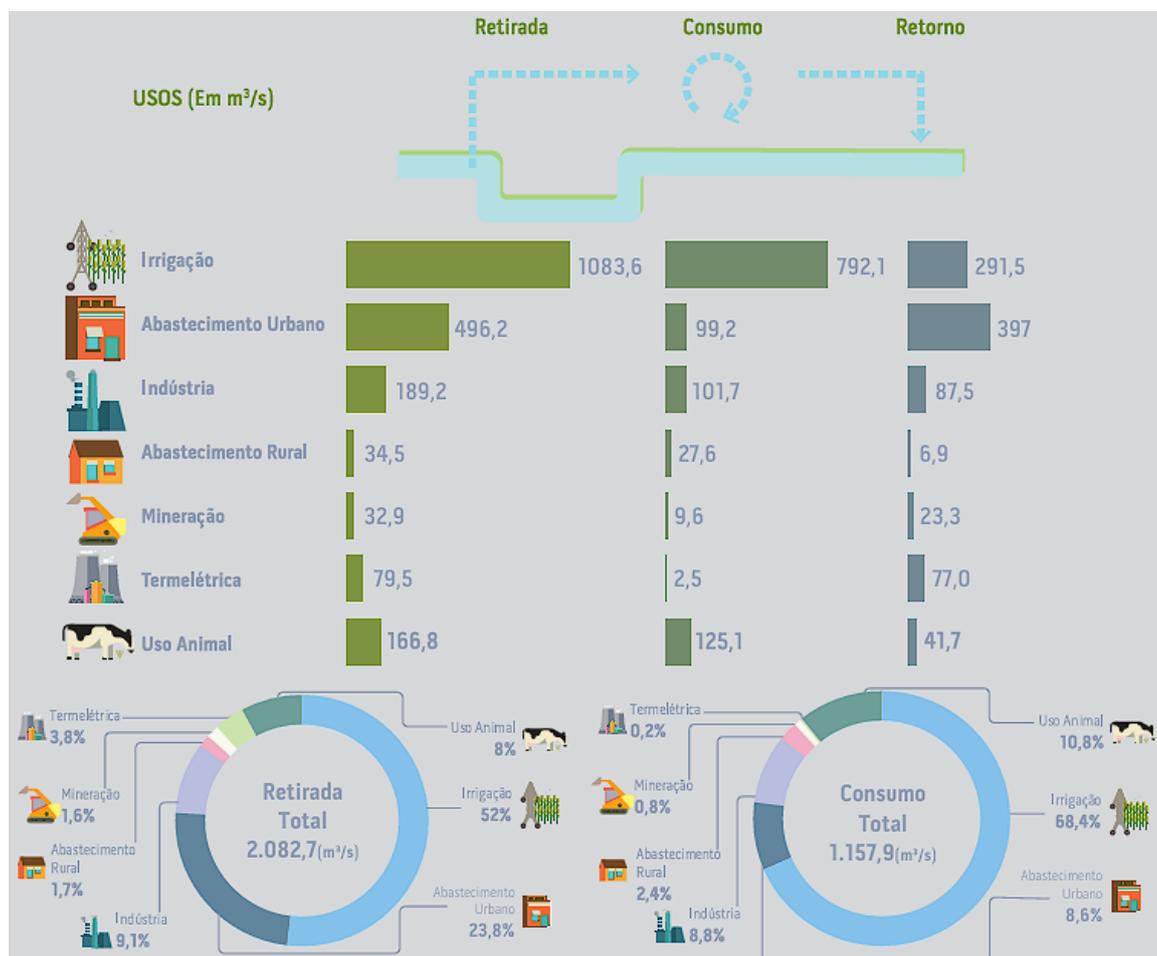
O Brasil, embora apresente abundância hídrica relativa em escala global, enfrenta desafios significativos em relação à distribuição espacial e temporal dos recursos hídricos. O país possui uma grande diversidade climática e geográfica, que

influencia diretamente a oferta e a demanda por água. A cultura da abundância hídrica está sendo progressivamente substituída pela compreensão da água como um bem finito e dotado de valor econômico, especialmente em regiões de escassez e em períodos de seca prolongada (ANA, 2019).

Os principais usos consuntivos da água são: abastecimento humano (urbano e rural), abastecimento animal, indústria de transformação, mineração, termelétrica, irrigação e evaporação líquida de reservatórios artificiais. Cada um desses usos apresenta peculiaridades quanto às vazões de retirada, consumo e retorno, refletindo a heterogeneidade das demandas e as características locais (ANA, 2019).

De acordo com a FIGURA 7, entre os setores consumidores, a agricultura irrigada destaca-se como o principal uso consuntivo, sendo responsável por cerca de 52% das retiradas de água no país. O abastecimento urbano aparece em seguida, representando aproximadamente 23,8%, enquanto a indústria de transformação utiliza cerca de 9,1% e o abastecimento animal 8%. A mineração e a geração termelétrica apresentam participação menor, mas são relevantes em áreas específicas (ANA, 2019).

Figura 7 - Demandas de uso da água no Brasil em 2017



Fonte: ANA (2017).

Apesar da abundância hídrica em regiões como a Amazônia, outras áreas enfrentam desafios relacionados ao uso intensivo e à gestão inadequada dos recursos. A região Nordeste, por exemplo, apresenta altos índices de consumo devido à irrigação, mas também enfrenta escassez hídrica devido às características climáticas e à concentração populacional em áreas semiáridas (ANA, 2019).

A demanda por água no Brasil tem crescido significativamente nas últimas décadas, impulsionada principalmente pela expansão da agricultura irrigada e pelo aumento da população urbana. Projeções indicam que até 2030 haverá um aumento de 24% na demanda total por água, reforçando a necessidade de estratégias de gestão hídrica eficientes para garantir a segurança do abastecimento e a sustentabilidade dos recursos (ANA, 2019).

2.3 Pegada Hídrica

A intensificação do consumo de água no mundo, associada à escassez crescente em diversas regiões, impulsionou a criação de ferramentas capazes de avaliar o uso dos recursos hídricos de forma integrada e sistemática. Nesse cenário, surge o conceito de pegada hídrica, desenvolvido por Hoekstra em 2002 (Hoekstra, 2003), é definida de acordo com o Manual de Avaliação da Pegada Hídrica (Hoekstra et al., 2011, p. 2). como:

“indicador do uso da água que considera não apenas o seu uso direto por um consumidor ou produtor, mas, também, seu uso indireto. [...] mostra os volumes de consumo de água por fonte e os volumes de poluição pelo tipo de poluição”.

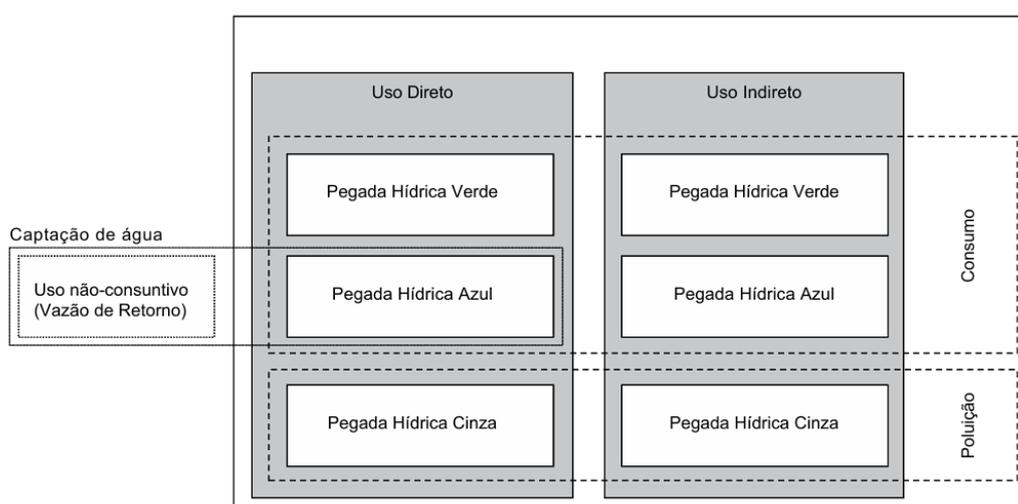
Ainda de acordo com o Manual de Avaliação da Pegada Hídrica (Hoekstra et al., 2011), esse conceito é dividido em três componentes principais:

- **Pegada Hídrica Azul:** refere-se ao volume de água doce retirada de corpos hídricos superficiais ou subterrâneos e que não retorna à bacia de origem, como a utilizada em processos de resfriamento, fabricação e irrigação.
- **Pegada Hídrica Verde:** representa a água da chuva incorporada diretamente na produção, especialmente relevante na agricultura e na vegetação natural.
- **Pegada Hídrica Cinza:** corresponde ao volume necessário de água doce para diluir poluentes a ponto de atender aos padrões de qualidade da água definidos pelas legislações locais.

Além dessa divisão a pegada hídrica pode ser direta ou indireta. Onde a pegada hídrica direta refere-se à água consumida ou poluída de forma imediata por indivíduos, empresas ou comunidades em suas atividades cotidianas. No meio doméstico, inclui o uso da água para higiene pessoal, preparo de alimentos, limpeza, entre outros fins essenciais. Já no contexto empresarial, envolve o consumo em processos internos como produção, manutenção e operação das instalações. De acordo com Cavalcante (2025), essa modalidade de pegada está associada ao uso perceptível e controlado da água, geralmente realizado dentro do espaço físico da residência ou da empresa, sem envolver os impactos indiretos que ocorrem ao longo da cadeia de produção.

Por outro lado, a pegada hídrica indireta diz respeito ao volume de água utilizado e ao grau de poluição gerado durante as etapas de produção de bens e serviços consumidos pela sociedade, mas que não ocorrem diretamente no ponto de uso final. Inclui, por exemplo, a água empregada no cultivo de alimentos, na fabricação de roupas, na geração de energia ou na produção de insumos industriais. Essa forma de pegada, por estar “oculta” nos processos anteriores à aquisição do produto pelo consumidor final, muitas vezes é negligenciada, embora represente a maior parte da pegada total. Como destaca Cavalcante (2025), a pegada hídrica indireta é geralmente mais significativa que a direta, especialmente porque envolve impactos difusos ao longo da cadeia produtiva, tornando sua mensuração e controle mais complexos. A FIGURA 8 esquematiza os componentes de uma pegada hídrica.

Figura 8 - Componentes da uma pegada hídrica

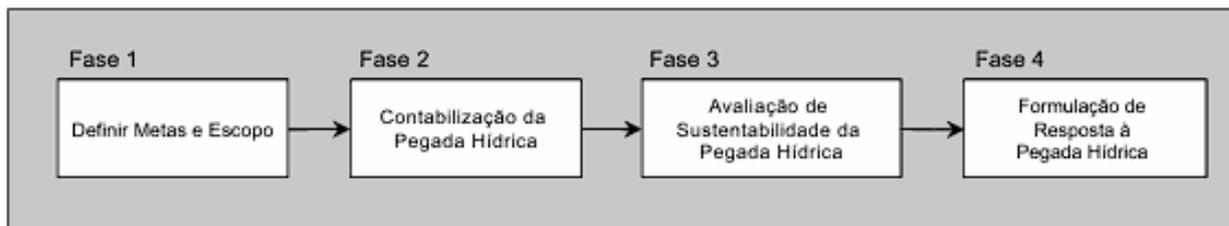


Fonte: Hoestra et al. (2011).

2.3.1 Cálculo da Pegada Hídrica

A metodologia de cálculo da pegada hídrica foi sistematizada por Hoekstra et al. (2011) por meio do Manual de Avaliação da Pegada Hídrica, que estabelece padrões internacionais para quantificar e avaliar o uso da água em produtos, processos, consumidores e territórios. A abordagem é baseada em quatro etapas principais (FIGURA 9): (1) Definir metas e escopo, (2) Contabilização da Pegada Hídrica, (3) avaliação de sustentabilidade e (4) formulação de respostas.

Figura 9 - Quatro fases distintas na avaliação da pegada hídrica



Fonte: Hoestra et al. (2011).

a) Definir metas e escopo

A primeira etapa consiste na definição do propósito do estudo e na delimitação do sistema de análise. Aqui, é determinado se o cálculo será feito para um produto, um processo específico, uma empresa, uma bacia hidrográfica ou um país. Essa fase também envolve a definição das fronteiras temporais e espaciais do estudo (Hoekstra et al., 2011).

b) Contabilização da Pegada Hídrica

A fase de contabilidade envolve o cálculo quantitativo dos três componentes da pegada hídrica: azul, verde e cinza. Esse cálculo é feito com base em dados sobre consumo de água e emissões de poluentes, sempre vinculando essas informações ao tempo e à localização geográfica do uso.

Segundo Souza (2014), essa etapa requer o levantamento de dados sobre volumes de captação de água, precipitação efetiva, taxas de evapotranspiração, retornos ao meio ambiente e carga de poluentes lançados, o que torna a metodologia robusta e passível de aplicação a diferentes setores.

c) Avaliação de sustentabilidade

Essa fase busca verificar se os volumes de água utilizados e os poluentes lançados estão dentro dos limites ambientais aceitáveis. A pegada hídrica é, portanto, avaliada em relação à capacidade de suporte da bacia hidrográfica onde o recurso é utilizado. Isso envolve o cruzamento da pegada hídrica calculada com indicadores de escassez e degradação da água em nível local.

Lima (2016) reforça que esse componente é essencial para que a pegada hídrica não seja apenas um indicador de consumo, mas uma ferramenta de análise crítica da sustentabilidade hídrica do território.

d) Formulação de respostas

A etapa final corresponde à proposição de estratégias para reduzir a pegada hídrica, melhorar a eficiência do uso da água e mitigar impactos ambientais.

Cavalcante (2025) argumenta que, no contexto do semiárido, isso pode incluir ações como reuso de água cinza, captação de água da chuva, otimização de processos produtivos e uso de tecnologias de baixo consumo.

2.3.2 Cálculo da Pegada Hídrica: Azul, Verde e Cinza

A avaliação da pegada hídrica baseia-se na estimativa do volume total de água doce utilizado, direta ou indiretamente, ao longo de uma cadeia produtiva. Essa mensuração é dividida em três componentes principais: azul, verde e cinza, cada uma representando uma categoria específica de uso ou impacto ambiental sobre os recursos hídricos.

a) Pegada Hídrica Azul

A pegada hídrica azul refere-se ao volume de água superficial e subterrânea retirado de fontes naturais para ser incorporado em produtos ou evaporado durante o processo produtivo. Esse tipo de água é frequentemente utilizado na irrigação agrícola, na indústria ou em sistemas de abastecimento urbano.

De acordo com Hoekstra et al. (2011), o cálculo da pegada azul é expresso como:

$$PH\ azul = Evap\ da\ água\ azul + Incor\ da\ água\ azul + Vazão\ de\ retorno\ perdida$$

Onde:

Evaporação da água azul: Refere-se à quantidade de água retirada de corpos hídricos superficiais (rios, lagos, açudes) ou subterrâneos (aquíferos), que é perdida para a atmosfera por evaporação durante o processo produtivo. É comum em sistemas de irrigação, torres de resfriamento ou lavagens industriais, onde a água não retorna ao seu corpo de origem.

Incorporação da água azul: É o volume de água que, após ser utilizado, é retido no produto final (como em alimentos, concreto, bebidas etc.) ou em subprodutos, sem

chance de retorno imediato ao ambiente. Representa o consumo direto e permanente da água azul.

Vazão de retorno perdida: Corresponde à parcela da água que, embora teoricamente pudesse ser devolvida ao meio, sofre perdas por infiltração, contaminação ou lançamento em locais sem conexão direta com o corpo hídrico original. Ou seja, mesmo sendo descartada, não contribui para a reposição dos recursos hídricos da bacia de onde foi retirada.

b) Pegada Hídrica Verde

A pegada hídrica verde representa o volume de água da chuva que é armazenado no solo (umidade do solo) e consumido pelas plantas via evapotranspiração, sendo particularmente relevante para a agricultura de sequeiro e atividades que dependem de precipitação direta. Esse tipo de pegada é importante para avaliar o uso sustentável de recursos naturais em regiões agrícolas.

Segundo Hoekstra et al. (2011), o cálculo da pegada verde é expresso como:

$$PH_{verde} = Evap\ de\ \acute{a}gua\ verde + Incor\ de\ \acute{a}gua\ verde$$

Onde:

Evaporação de água verde: Refere-se à quantidade de água da chuva que, após ser absorvida pelo solo, evapora diretamente da superfície ou é transpirada pelas plantas (evapotranspiração). Essa é a principal forma de consumo da água verde em sistemas agrícolas de sequeiro (sem irrigação), florestas e pastagens.

Incorporação de água verde: É o volume de água verde que é absorvido pelas plantas e incorporado na biomassa vegetal (folhas, caules, frutos, raízes). Essa água permanece no produto colhido e, portanto, é contabilizada como consumo definitivo, pois não retorna ao ciclo local.

c) Pegada Hídrica Cinza

A pegada hídrica cinza está relacionada à quantidade de água necessária para diluir poluentes gerados durante o processo produtivo, de forma a atender aos padrões de qualidade ambiental estabelecidos. É uma medida indireta do impacto da poluição sobre os corpos d'água.

O cálculo, de acordo com Hoekstra et al. (2011), é feito pela seguinte fórmula:

$$PH \text{ cinza} = \frac{L}{(c_{max} - c_{nat})}$$

Onde:

L: *Carga de poluente (massa/tempo)*: É a quantidade de uma substância poluente (como nitrato, fósforo, óleo, metais pesados etc.) lançada no corpo hídrico, medida geralmente em quilogramas por dia ou miligramas por segundo. Essa carga pode vir, por exemplo, do esgoto industrial ou da água residual usada no processo produtivo.

c_{max}: *Concentração máxima aceitável (mg/L)*: Refere-se ao limite legal ou ambientalmente aceitável da concentração do poluente no corpo hídrico receptor, segundo normas como a Resolução CONAMA nº 357/2005. Representa o valor máximo que não compromete a qualidade da água.

c_{nat}: *Concentração natural do poluente (mg/L)*: É a concentração do poluente no corpo hídrico antes do impacto antrópico, ou seja, o nível natural encontrado em condições não poluídas. Esse valor é importante porque mostra o quanto o corpo d'água já possui da substância em questão antes do lançamento do efluente.

2.3.3 Cálculo da Pegada Hídrica de um Produto

O cálculo da pegada hídrica de um produto consiste na quantificação do volume total de água doce consumida (azul e verde) e poluída (cinza) ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas até o descarte ou reutilização. Esse processo é também conhecido como avaliação da pegada hídrica de um produto e tem como objetivo fornecer uma medida abrangente e comparável do impacto hídrico associado à produção e consumo de bens e serviços (Hoekstra et al., 2011).

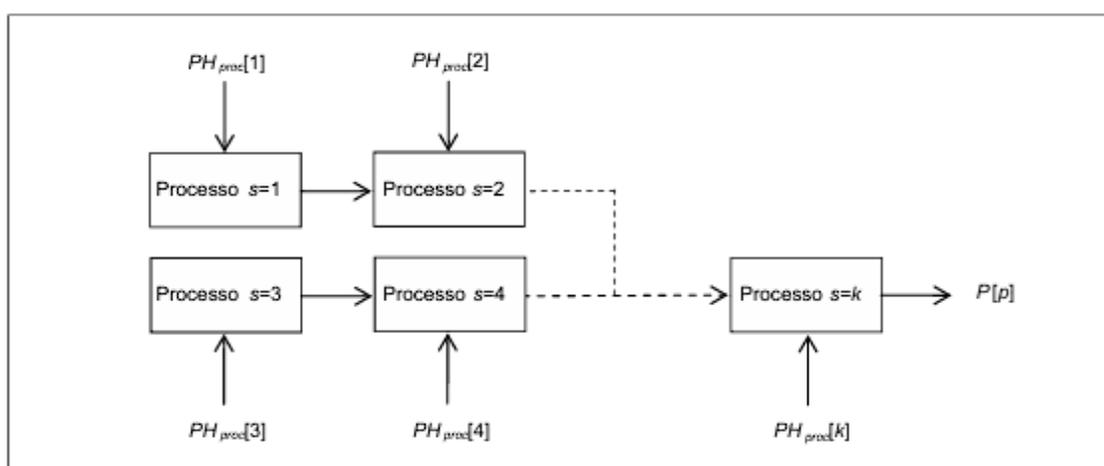
Para realizar o cálculo, é necessário delimitar claramente o sistema de produção e identificar todos os insumos, fluxos de água e emissões ao longo das etapas produtivas. A pegada hídrica total do produto (PHprod) é composta pelas três frações: PH azul, PH verde e PH cinza. Cada uma dessas parcelas é estimada para cada processo e insumo envolvido na cadeia produtiva.

De forma geral, segundo Hoekstra et al. (2011), a pegada hídrica de um produto pode ser obtida somando-se a pegada hídrica de todos os processos envolvidos na produção unitária do bem. A unidade de medida geralmente utilizada é o volume de

água (litros ou metros cúbicos) por unidade do produto final (por exemplo, litros ou metros cúbicos de água por tonelada ou metro cúbico de concreto usinado).

Para calcular a pegada hídrica em casos simples onde o sistema produtivo produz um único produto final é utilizando a abordagem da soma das cadeias (FIGURA 10). Nesse contexto específico, as pegadas hídricas relacionadas às diferentes etapas do processo no sistema produtivo podem ser integralmente atribuídas ao produto final.

Figura 10 - Esquematisação do sistema de produção do produto “p” em “k” passos de processo.



Fonte: Hoestra et al. (2011).

O sistema produtivo mostrado na figura consiste em uma série de processos ($s=1,2,3,\dots,k$) que ocorrem de forma sequencial ou paralela para obter o produto final "p". Cada processo gera uma pegada hídrica específica ($PH_{proc}[s]$). A pegada hídrica do produto "p" é dada pela fórmula:

$$(PH_{proc}[p]) = \frac{\sum_{s=1}^n (PH_{proc}[s])}{P[p]}$$

Onde:

$PH_{proc}[p]$: Pegada hídrica do produto "p" (volume/massa).

$PH_{proc}[s]$: Pegada hídrica do processo "s" (volume/tempo).

$P[p]$: Quantidade produzida do produto "p" (massa/tempo).

s : Índice que representa cada processo no sistema produtivo (de 1 a k).

n : Número total de processos que compõem o sistema produtivo.

Esse método é ideal para sistemas produtivos que têm um fluxo bem definido, onde os processos podem ser claramente identificados e mensurados.

2.3.4 Aplicações Práticas da Pegada Hídrica

A PH (Pegada Hídrica) tem se consolidado como uma ferramenta prática de gestão e diagnóstico ambiental, sendo aplicada em diversas escalas: produtos, processos produtivos, organizações, cadeias de suprimentos, bacias hidrográficas e políticas públicas. Segundo Hoekstra et al. (2011), o conceito permite não apenas quantificar o uso da água, mas também localizar e compreender os impactos associados a esse uso ao longo do ciclo de vida de bens e serviços.

Na escala organizacional, empresas utilizam a metodologia para identificar seus pontos de maior consumo hídrico e buscar alternativas de redução, como reuso de água, melhorias em processos e substituição de matérias-primas. Como destaca Lima (2016), isso tem sido particularmente relevante para setores com alto consumo de água, como o têxtil, alimentício, siderúrgico e da construção civil, que enfrentam pressão crescente por práticas mais sustentáveis.

No caso específico da construção civil, a aplicação da pegada hídrica ainda é relativamente recente, mas promissora. Souza (2014) ressalta que, embora existam diversos indicadores ambientais nesse setor, a pegada hídrica se destaca por possibilitar uma análise integrada dos impactos diretos e indiretos associados à cadeia produtiva, como a fabricação de cimento, concreto e outros insumos. Cavalcante (2025) complementa que, em regiões semiáridas como o interior da Paraíba, a análise da pegada hídrica pode servir de base para políticas de incentivo ao uso racional da água e ao aproveitamento de fontes alternativas.

Em nível de produto, a pegada hídrica permite avaliar o volume de água necessário para produzir uma unidade de determinado item, seja um quilo de carne bovina, um litro de leite ou uma tonelada de cimento. Essa aplicação é essencial para consumidores e formuladores de políticas públicas entenderem os impactos “escondidos” no consumo cotidiano. O estudo de Hoekstra et al. (2011) demonstrou, por exemplo, que produtos de origem animal apresentam pegadas hídricas significativamente maiores do que vegetais, evidenciando a importância de considerar o fator hídrico nas decisões de consumo e planejamento agrícola.

Já no planejamento territorial, especialmente em bacias hidrográficas críticas, a pegada hídrica é utilizada para subsidiar análises de sustentabilidade hídrica regional. De acordo com o manual de Hoekstra et al. (2011), é possível aplicar o conceito para calcular a pegada hídrica de uma bacia e compará-la à disponibilidade local, gerando indicadores como o “excedente” ou “déficit hídrico”. Essa abordagem é valiosa para a gestão integrada dos recursos hídricos, uma vez que permite confrontar demanda e oferta de forma quantitativa e espacializada.

Além disso, organismos internacionais e governos nacionais têm integrado o conceito em políticas públicas voltadas à segurança hídrica. A Organização das Nações Unidas (UNESCO, 2020) tem promovido o uso da pegada hídrica como instrumento para medir avanços no ODS 6 (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável), incentivando a adoção da ferramenta em diagnósticos e planos de ação para reduzir o estresse hídrico.

Portanto, a pegada hídrica, ao ultrapassar o campo teórico, se revela como instrumento técnico e político de gestão sustentável da água, especialmente em regiões com escassez, como o semiárido paraibano, onde a relação entre produção, consumo e disponibilidade hídrica é crítica e demanda ações embasadas em evidências quantitativas.

2.3.5 Limitações e Desafios da Pegada Hídrica

Embora a PH seja uma importante ferramenta para avaliar o consumo e o impacto do uso da água em atividades humanas, sua aplicação enfrenta uma série de limitações e desafios, tanto no âmbito teórico quanto prático.

a. Complexidade de Cálculo

O cálculo da pegada hídrica envolve três componentes principais: azul, verde e cinza. Cada uma delas depende de variáveis específicas, como evaporação, incorporação de água e carga poluidora. A obtenção desses dados nem sempre é direta ou padronizada, especialmente em atividades industriais que utilizam diversas fontes de água ao longo de processos complexos. Essa dificuldade é ressaltada por Hoekstra et al. (2011), que destacam a necessidade de dados precisos e atualizados para assegurar a confiabilidade dos resultados.

b. Contexto Geográfico

A pegada hídrica de um mesmo produto pode variar substancialmente conforme a localização geográfica. Fatores como clima, disponibilidade hídrica local e características do solo influenciam diretamente os valores obtidos. De acordo com Souza (2014), isso torna difícil a comparação entre produtos produzidos em diferentes regiões, mesmo que a metodologia de cálculo seja rigorosamente a mesma.

c. Fatores Econômicos e Sociais

Apesar de sua precisão técnica, a pegada hídrica não leva em consideração questões qualitativas, como os conflitos pelo uso da água e a distribuição desigual dos recursos hídricos. Em regiões semiáridas, por exemplo, um pequeno aumento no consumo de água pode gerar impactos sociais significativos, enquanto áreas com maior abundância hídrica podem suportar maiores volumes sem comprometer o abastecimento. Segundo Lima (2016), é necessário considerar os aspectos socioeconômicos locais para interpretar adequadamente os resultados obtidos.

d. Interpretação dos Resultados

Ainda que o cálculo da pegada hídrica seja rigoroso, sua interpretação é frequentemente alvo de questionamentos. Os resultados apresentados em volume de água consumido ou poluído nem sempre refletem adequadamente os impactos ambientais locais. Além disso, segundo Cavalcante (2025), a comunicação dos resultados para empresas e gestores públicos enfrenta obstáculos, pois o conceito técnico nem sempre é compreendido em sua totalidade.

Portanto, embora a pegada hídrica seja um indicador útil e amplamente aceito, sua aplicação prática deve considerar as limitações intrínsecas e os desafios interpretativos.

2.4 Produção de Concreto Usinado e suas Demandas Hídricas

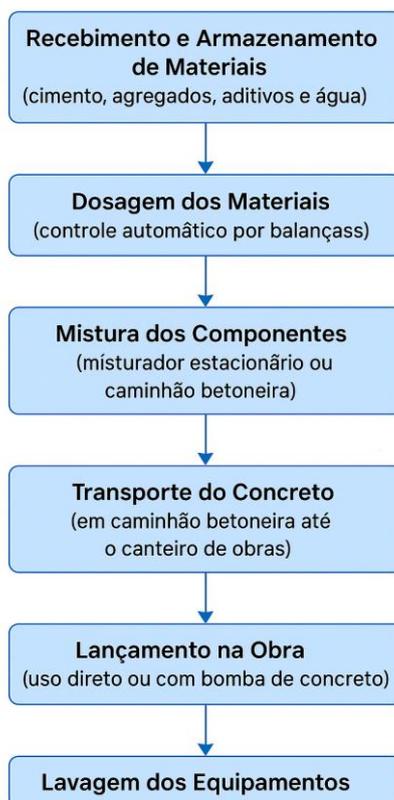
O concreto usinado é uma mistura composta por cimento, agregados miúdos e graúdos, água e, eventualmente, aditivos químicos, preparada em centrais dosadoras sob controle técnico rigoroso, sendo posteriormente transportada até o local de aplicação por caminhões betoneira. Sua principal vantagem em relação ao concreto

preparado em obra é a padronização da dosagem e a garantia de qualidade, visto que sua produção segue normas técnicas específicas, como a NBR 7212 – Execução de concreto dosado em central (ABNT, 2012), que define os procedimentos para dosagem, preparo, controle e transporte. Além disso, o ambiente controlado das centrais reduz variabilidades que poderiam comprometer o desempenho do concreto, promovendo maior eficiência e segurança estrutural (OLIVEIRA, 2020).

2.4.1 Visão Geral do Processo de Produção de Concreto Usinado

A produção de concreto usinado em empresas de grande porte segue procedimentos padronizados que visam garantir a uniformidade, qualidade e eficiência do produto final. A FIGURA 11 apresenta o fluxograma do processo de produção

Figura 11 - Fluxograma do processo de produção do concreto usinado



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025)

O processo inicia-se com o recebimento e armazenamento dos insumos, entre eles cimento, agregados miúdos e graúdos, aditivos químicos e água. O cimento é geralmente estocado em silos verticais fechados, enquanto os agregados são armazenados em baias abertas, o que exige um controle rigoroso da umidade, sobretudo da areia, para que se mantenha a precisão na dosagem da água de amassamento (BARRETO, 2015).

A dosagem dos materiais é realizada por sistemas automatizados que pesam cada componente de acordo com o traço pré-determinado. Esses sistemas também controlam e registram eletronicamente a quantidade de água e aditivos líquidos inseridos, garantindo maior precisão e rastreabilidade do processo (OLIVEIRA, 2020).

Em usinas de grande porte, a mistura pode ocorrer em misturadores estacionários, mas é comum que a mistura aconteça no próprio tambor giratório dos caminhões betoneira. Esse tambor opera em rotações controladas, garantindo homogeneização da mistura até o momento da aplicação. Os caminhões têm capacidade média de 7 a 10 m³ e contam com reservatórios de água (300 a 600 litros) que permitem ajustes na consistência do concreto durante o transporte (BARRETO, 2015).

O transporte até a obra é feito imediatamente após a mistura, com o tambor girando continuamente para evitar segregação. No local da obra, o concreto é lançado e amostrado para ensaios de controle tecnológico. Todas essas etapas seguem as normas da ABNT, que estabelece os requisitos para o controle da produção de concreto (OLIVEIRA, 2020).

2.4.2 Etapas do Processo com Uso de Água

A utilização de água na produção de concreto usinado ocorre, principalmente, em três frentes: amassamento, limpeza e controle tecnológico. A água de amassamento é aquela incorporada diretamente à mistura, sendo indispensável para a hidratação do cimento, garantindo trabalhabilidade e resistência ao concreto. Essa água é cuidadosamente dosada com base no teor de umidade dos agregados, especialmente da areia, de modo a manter o fator *a/c* (água/cimento) dentro dos limites especificados. O controle dessa etapa é essencial para garantir a qualidade final do concreto (OLIVEIRA, 2020).

A segunda frente de consumo refere-se à água de limpeza, utilizada na lavagem de equipamentos e caminhões betoneira. A higienização é realizada ao final de cada ciclo de entrega ou, em alguns casos, apenas no fim do expediente. A lavagem do tambor, funil, mangueiras e pneus consome volumes significativos de água, em média, cerca de 300 litros por caminhão, conforme demonstrado em ensaio realizado com recipientes calibrados (OLIVEIRA, 2020). Essa água não integra o concreto, mas é parte expressiva da demanda hídrica da usina.

O controle tecnológico, por sua vez, envolve volumes menores de água, utilizados na moldagem, cura e ensaios com corpos de prova. Essa água deve ser potável ou equivalente, conforme estabelecido pela NBR 15900, e embora o consumo seja relativamente baixo, integra o balanço hídrico total das operações (BARRETO, 2015).

2.4.3 Fontes de Abastecimento Hídrico nas Usinas de Concreto

As usinas de concreto de grande porte normalmente contam com múltiplas fontes de abastecimento hídrico para garantir a continuidade das operações e reduzir a dependência de redes públicas. A principal fonte observada nas usinas é o poço artesiano, que oferece autonomia operacional e menor custo em relação ao fornecimento municipal. Essa água é utilizada tanto no amassamento quanto nas lavagens dos equipamentos (OLIVEIRA, 2020).

Além disso, muitas usinas possuem sistemas de decantação e reúso, nos quais a água proveniente da lavagem dos caminhões e da limpeza do pátio é direcionada para tanques onde os sólidos são separados por sedimentação. Essa água pode então ser reutilizada em lavagens subsequentes, embora raramente seja empregada no amassamento devido às exigências de qualidade da NBR 15900 (OLIVEIRA, 2020).

A captação de água da chuva é apontada pela literatura como uma alternativa viável, desde que sejam respeitadas as exigências de qualidade da água para uso na produção de concreto. Segundo Barreto (2015), essa prática poderia complementar o abastecimento e contribuir para a sustentabilidade das operações, especialmente em regiões com índices razoáveis de precipitação.

A diversificação das fontes e a gestão eficiente da água são fundamentais para reduzir a pegada hídrica das empresas do setor, especialmente em regiões semiáridas ou com restrições de disponibilidade hídrica.

2.4.4 Pontos Críticos de Consumo de Água

Na produção de concreto usinado, alguns pontos do processo produtivo se destacam pelo elevado consumo de água, sendo considerados críticos tanto do ponto de vista operacional quanto ambiental. O principal deles é, sem dúvida, o uso da água para amassamento, que representa o maior volume de água incorporada ao produto final. Essa água é essencial para a hidratação do cimento e para garantir a trabalhabilidade adequada da mistura. No entanto, o volume exato consumido pode variar conforme o tipo e a umidade dos agregados, especialmente da areia. A falta de controle sobre esse parâmetro pode resultar em dosagens imprecisas, levando ao desperdício de água e à instabilidade do traço (OLIVEIRA, 2020).

Outro ponto crítico amplamente identificado nas usinas de concreto é o consumo associado à lavagem dos caminhões betoneira. Essa etapa, embora não envolva água incorporada ao produto, é responsável por volumes expressivos de consumo hídrico. As lavagens ocorrem de forma recorrente ao longo do dia, geralmente após cada entrega de concreto. Segundo levantamento realizado por Oliveira (2020), o volume médio por lavagem pode ultrapassar os 300 litros por caminhão, dependendo da política de higienização adotada pela usina. Em muitas centrais, essa prática não é acompanhada por sistemas de medição precisos, dificultando o controle e a gestão do uso da água nessa etapa.

Além da lavagem dos caminhões, a limpeza de equipamentos internos, como funis, correias transportadoras, silos e misturadores, também contribui significativamente para o consumo total de água. Esse consumo é potencializado em dias de alta produção ou em casos de manutenção corretiva, quando se faz necessário o desmonte e a limpeza de partes da planta. A depender da frequência e do volume de concreto produzido, essas atividades podem representar uma parcela relevante da pegada hídrica da empresa (BARRETO, 2015).

Por fim, embora menos expressivo, o consumo de água nos procedimentos de controle tecnológico, especialmente na moldagem e cura de corpos de prova, também deve ser considerado. Ainda que esse volume seja reduzido, sua importância reside

no fato de exigir água de melhor qualidade, conforme as normas técnicas da ABNT, o que implica maior atenção em relação à sua origem e tratamento (BARRETO, 2015).

A identificação desses pontos críticos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de gestão hídrica mais eficientes nas usinas de concreto. Medidas como a automação da dosagem, o uso de aditivos plastificantes, a implementação de sistemas de reúso e o monitoramento sistemático do consumo podem contribuir para a redução significativa da demanda hídrica nessas operações industriais.

2.4.5 Impactos da Produção na Pegada Hídrica

A produção de concreto usinado, como já descrito nas etapas anteriores, está fortemente associada ao consumo direto de recursos hídricos, o que a torna uma atividade de significativa contribuição para a pegada hídrica azul. Essa categoria da pegada hídrica, conforme definida por Hoekstra et al. (2011), diz respeito ao volume de água doce superficial ou subterrânea que é consumido e não retorna à bacia hidrográfica de origem em condições utilizáveis.

Nas usinas de concreto, o impacto na pegada hídrica azul decorre principalmente, à mistura de concreto e a utilizada nas atividades operacionais. Embora a água de amassamento seja tecnicamente indispensável, a ausência de controle preciso da umidade dos agregados, notadamente quando armazenados ao ar livre, pode levar a dosagens excessivas, aumentando o volume consumido além do necessário (OLIVEIRA, 2020). Além disso, o uso intensivo de água na lavagem dos caminhões betoneira e equipamentos representa outro fator crítico, sobretudo porque grande parte dessa água, mesmo quando parcialmente tratada, não é reaproveitada adequadamente, gerando perdas significativas (OLIVEIRA, 2020). A falta de quantificação precisa desses volumes, somada ao uso em processos auxiliares como a cura de corpos de prova e a limpeza de áreas produtivas, dificulta uma estimativa confiável da pegada hídrica total das usinas, conforme alerta Barreto (2015).

A análise da pegada hídrica nessas unidades produtivas permite compreender a relação entre o consumo de água e a eficiência dos processos, e pode orientar a adoção de medidas de gestão sustentável, como o reaproveitamento de água de lavagem, o uso de sensores para monitoramento de umidade dos agregados, ou a substituição parcial da água potável por fontes alternativas tratadas, como águas pluviais.

Portanto, ao considerar a pegada hídrica azul como métrica de impacto ambiental, é possível estabelecer um parâmetro técnico e comparativo para avaliar o desempenho hídrico de diferentes usinas de concreto. Tal abordagem fornece subsídios para a formulação de políticas de uso racional da água no setor da construção civil, contribuindo diretamente para a sustentabilidade hídrica regional.

2.5 Estratégias para Redução do Consumo de Água

2.5.1 Reúso e Reciclagem da Água nas Usinas de Concreto

O reúso e a reciclagem da água têm se consolidado como estratégias fundamentais para reduzir o impacto hídrico da produção de concreto usinado, especialmente em empresas de grande porte que operam com elevados volumes de consumo. Nas usinas, o maior potencial de reúso está associado à água utilizada na lavagem dos caminhões betoneira e de equipamentos, que representa uma fração significativa do consumo total diário. Segundo estudo de Oliveira (2020), a lavagem dos caminhões pode consumir centenas de litros por viagem, sendo muitas vezes realizada sem controle ou medição precisa, o que agrava o desperdício e dificulta a gestão racional do recurso.

Uma das práticas mais adotadas é o reaproveitamento da água residual oriunda da lavagem. Para isso, a água contaminada com cimento, areia e outros resíduos é direcionada para sistemas de tanques de decantação, nos quais os sólidos são sedimentados, permitindo a coleta da água clarificada para usos não nobres, como novas lavagens de equipamentos e irrigação de pátios. No entanto, para que a água reciclada possa ser empregada com segurança e dentro dos padrões normativos, é necessário garantir que o resíduo sólido remanescente não ultrapasse 1% da massa total de agregados do traço, conforme estabelece a NBR 15900 (ABNT, 2009).

O uso direto dessa água na produção de concreto, no entanto, exige maior rigor no controle de qualidade, pois características como pH elevado e turbidez residual podem comprometer o desempenho do concreto. Paula e Fernandes (2015) demonstram que, mesmo após a passagem por câmaras de decantação, os valores de pH permaneceram acima de 12, indicando a necessidade de etapas adicionais de

tratamento, como a coagulação com agentes naturais ou correção química com ácidos, para adequar a água aos padrões de reúso.

A adoção de sistemas de reaproveitamento de água não apenas reduz a extração de fontes primárias, como poços ou redes públicas, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais, ao evitar o descarte inadequado de efluentes no solo ou em corpos hídricos. Entretanto, os dados coletados por Oliveira (2020) revelam que muitas usinas ainda não contam com infraestrutura adequada para realizar esse reaproveitamento de forma sistematizada, e operam sem monitoramento confiável dos volumes utilizados ou tratados, o que limita a eficácia das práticas de reúso.

Dessa forma, investir em sistemas de captação, decantação e tratamento da água de lavagem torna-se não apenas uma exigência ambiental, mas uma estratégia economicamente viável e essencial para a sustentabilidade operacional das usinas de concreto.

2.5.2 Captação de Água da Chuva

A adoção de sistemas de captação de água da chuva nas usinas de concreto representa uma alternativa técnica e economicamente viável para reduzir a dependência de fontes tradicionais de abastecimento, como poços artesianos e redes públicas. Essa estratégia, quando bem planejada e dimensionada, pode suprir parte relevante da demanda hídrica das centrais, especialmente para usos não potáveis, como lavagem de caminhões e pátios. Souza Júnior (2011) destaca que a ampla cobertura dos galpões industriais em usinas de concreto proporciona uma área considerável para captação de água, tornando o sistema especialmente vantajoso para esse tipo de instalação.

Para a implantação de um sistema eficiente de captação pluvial, é necessário considerar componentes como calhas, condutores verticais e horizontais, filtros de retenção de sólidos e cisternas de armazenamento. O dimensionamento do reservatório deve estar de acordo com a área de captação e a média pluviométrica local, de modo a garantir o atendimento da demanda durante os períodos de estiagem. Em um estudo de caso sobre uma usina de concreto, Souza Júnior (2011) identificou que a instalação de três cisternas de 15 m³ seria suficiente para substituir até 93% da

água potável utilizada mensalmente no processo produtivo, com retorno do investimento em aproximadamente seis anos.

Outro aspecto relevante é a qualidade da água da chuva. Apesar de ser, em muitos casos, superior à de fontes superficiais ou subterrâneas devido à menor exposição a contaminantes, a água pluvial ainda necessita de cuidados em relação ao sistema de captação e ao tipo de telhado utilizado. A NBR 10844:1989 estabelece as diretrizes para as instalações prediais de águas pluviais, enquanto a NBR 15900:2009 define os requisitos para uso da água em processos de amassamento de concreto. Segundo Souza Júnior (2011), as águas coletadas em telhados não frequentados por animais apresentam qualidade satisfatória para aplicações industriais, desde que sejam submetidas a filtragem e armazenadas em reservatórios adequados.

Entre os benefícios adicionais do uso da água da chuva, destacam-se a diminuição da sobrecarga nos sistemas de drenagem urbana, a redução do escoamento superficial e a minimização do risco de enchentes. Souza Júnior (2011) enfatiza que, além do ganho ambiental, a prática proporciona economia financeira ao reduzir os custos com tarifas de fornecimento público de água.

Portanto, a captação e o uso da água da chuva se mostram estratégias promissoras dentro da gestão hídrica das usinas de concreto, contribuindo para a redução da pegada hídrica e para o fortalecimento da sustentabilidade operacional do setor.

2.5.3 Tecnologias de Eficiência Hídrica no Processo Produtivo

A adoção de tecnologias voltadas à eficiência hídrica nas usinas de concreto tem se mostrado uma medida indispensável para reduzir o desperdício de água e aprimorar a sustentabilidade do processo produtivo. Entre as principais soluções adotadas destacam-se os sistemas automatizados de dosagem de água, os sensores de umidade dos agregados e os softwares de gestão operacional, que possibilitam controle preciso da quantidade de água empregada no amassamento e nas demais etapas do processo.

Um dos fatores que mais influenciam o consumo de água é o teor de umidade dos agregados, especialmente da areia. Em usinas que realizam a estocagem a céu aberto, a variação da umidade dos materiais pode ser significativa, resultando em

dosagens imprecisas caso não haja correção adequada no sistema. Oliveira (2020) identificou que, apesar de os sistemas dosadores possuírem capacidade de abatimento automático da umidade, muitas empresas ainda não possuem sensores eficazes ou não utilizam os dados corretamente, o que contribui para o consumo excessivo de água.

A utilização de softwares de automação da dosagem tem permitido o registro detalhado de cada carga produzida, incluindo o volume exato de água adicionado. Esses sistemas são programáveis conforme o traço especificado, e suas interfaces permitem ajustes dinâmicos baseados em parâmetros técnicos definidos por engenheiros responsáveis. A partir da análise dos relatórios gerados, é possível comparar o consumo real com os parâmetros de referência e, assim, implementar ajustes operacionais para maximizar a eficiência hídrica (OLIVEIRA, 2020).

Além dos controles digitais, as usinas também têm investido em tecnologias complementares, como balanças eletrônicas de alta precisão, que garantem a correta proporção entre os materiais, evitando excesso de água por erro humano, e medidores de vazão, que possibilitam acompanhar em tempo real a quantidade de água utilizada em cada etapa. Essas tecnologias estão alinhadas ao conceito de produção mais limpa, que busca reduzir o uso de insumos sem comprometer a qualidade do produto final.

De forma complementar, a formação técnica das equipes sobre os impactos do excesso de água no desempenho do concreto também tem sido empregadas como parte de uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos.

Portanto, a incorporação de tecnologias de monitoramento, controle e automação nas usinas de concreto representa uma estratégia fundamental para otimizar o uso da água, reduzir perdas operacionais e assegurar o atendimento às normas de desempenho, contribuindo significativamente para a redução da pegada hídrica do setor.

2.5.4 Concretos com Menor Demanda Hídrica

Uma das estratégias mais eficazes para reduzir o consumo de água na produção de concreto usinado é o uso de tecnologias que permitam a formulação de traços com menor relação água/cimento (a/c), mantendo ou até melhorando a trabalhabilidade e o desempenho mecânico do material. Nesse contexto, destacam-

se o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes, que promovem maior fluidez da mistura sem a necessidade de adicionar mais água, além da seleção adequada dos agregados miúdos, com granulometria e teor de umidade controlados.

Os aditivos superplastificantes, são especialmente eficazes para a redução de água de amassamento, pois atuam dispersando as partículas de cimento e reduzindo a necessidade de água para atingir determinada consistência. De acordo com Oliveira (2020), esses aditivos são amplamente utilizados nas usinas e são responsáveis por uma redução significativa no consumo hídrico da mistura, mesmo em traços com agregados que naturalmente exigiriam maior volume de água, como a areia de britagem.

Além dos aditivos, a qualidade dos agregados tem papel determinante no consumo hídrico. Agregados miúdos com alta absorção, como a areia de britagem, demandam mais água para atingir o estado de saturação, o que pode elevar o consumo total caso não haja correção adequada no cálculo da água de amassamento. Estima-se que o uso de areia com granulometria mais fina e alto teor de filler aumenta significativamente a necessidade de água para manter a trabalhabilidade do concreto (OLIVEIRA, 2020). Assim, o uso de areia grossa, bem graduada contribui diretamente para a redução da demanda hídrica.

Outro caminho promissor para minimizar a quantidade de água necessária são os concretos de alto desempenho, como o concreto autoadensável (CAA) e o concreto de alta resistência inicial. Ambos utilizam aditivos especiais que reduzem a quantidade de água, mantendo ou aumentando a resistência mecânica e a fluidez da mistura. O concreto autoadensável, por exemplo, é formulado com superplastificantes e modificadores de viscosidade, o que permite sua aplicação sem a necessidade de vibração, minimizando o uso de água em obras e otimizando o processo produtivo (OLIVEIRA, 2020).

Dessa forma, a reformulação dos traços com o uso de aditivos apropriados e agregados otimizados, aliada a uma gestão criteriosa da umidade dos materiais, permite às concreteiras reduzir de forma efetiva a demanda de água, sem comprometer a qualidade e o desempenho estrutural do concreto.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentados os procedimentos metodológicos adotados para a realização da pesquisa, com o intuito de garantir uma análise rigorosa e precisa da pegada hídrica total em empresas de concreto usinado em cidades da Paraíba. Serão detalhados o tipo de pesquisa, o universo e a amostra selecionada, as fontes e instrumentos de coleta de dados, bem como os procedimentos utilizados para a análise e interpretação dos resultados. A escolha desses métodos visa assegurar que os objetivos propostos sejam alcançados de maneira eficiente e que os dados obtidos sejam confiáveis e relevantes para as conclusões do estudo.

3.1 Tipo De Pesquisa

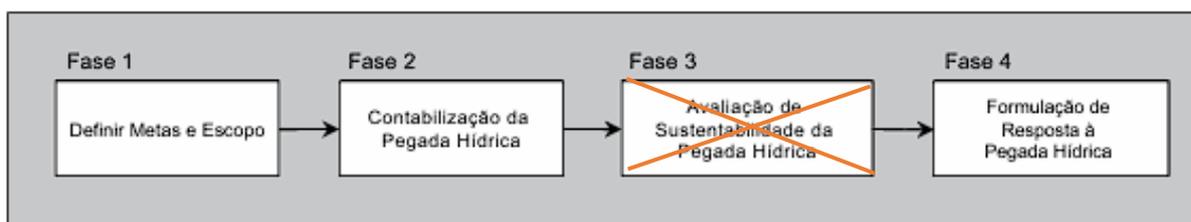
A presente pesquisa envolve parcialmente a metodologia proposta por Hoekstra et al. (2011) para quantificar e avaliar o uso da água na produção de concreto usinado sendo esta composta por 3 fases principais (FIGURA 12):

Fase 1: Definição de Objetivos e Escopo: (Delimitação do Estudo),

Fase 2: Contabilização da pegada Hídrica (Procedimentos para Cálculo da Pegada Hídrica)

Fase 3: Formulação de resposta a pegada Hídrica (Avaliar Estratégias de Redução)

Figura 12 - Fases de execução da pegada hídrica neste estudo.



Fonte: Adaptada de Hoekstra et al. (2011).

Esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa e qualitativa, combinando elementos de natureza descritiva e exploratória. A abordagem quantitativa será utilizada para mensurar o volume de água consumido, calcular a pegada hídrica e realizar comparações numéricas entre as empresas de concreto usinado analisadas.

Paralelamente, a abordagem qualitativa foi empregada para interpretar os dados obtidos, analisar os processos produtivos e identificar práticas de gestão hídrica adotadas pelas empresas.

Segundo Gil (2008), a pesquisa descritiva tem como principal objetivo a caracterização de determinado fenômeno ou a descrição das relações entre suas variáveis, buscando observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos sem manipulá-los. Dessa maneira, esta pesquisa é classificada como descritiva, pois busca caracterizar o consumo de água e a pegada hídrica nas empresas estudadas, e exploratória, dada a escassez de estudos específicos sobre o tema no contexto paraibano.

Quanto aos meios, trata-se de uma pesquisa de campo, uma vez que os dados primários serão coletados diretamente nas empresas, por meio de formulários, entrevistas e análise de documentos internos, complementados por fontes secundárias.

A opção pela utilização simultânea de métodos qualitativos e quantitativos justifica-se pela natureza multifacetada da questão de pesquisa. Conforme afirma Günther (2006), a escolha do método deve ser orientada pela adequação à pergunta científica e não por uma oposição rígida entre paradigmas metodológicos, de modo que ambas as abordagens, ao serem utilizadas de forma complementar, enriquecem a compreensão do fenômeno estudado.

3.2 Delimitação do Estudo

Esta pesquisa delimita-se ao estudo de empresas de concreto usinado localizadas em cidades do estado da Paraíba (FIGURA 13), Brasil. A escolha desta delimitação geográfica se justifica pelas características hídricas da região, marcada pela escassez de água e pela necessidade de práticas sustentáveis no setor da construção civil.

Figura 13 - Delimitação do estado da Paraíba

Fonte: Google maps (2025).

O objeto de investigação compreende a análise da pegada hídrica nas empresas selecionadas, considerando suas operações produtivas ao longo do ano de 2024. Foram estudados aspectos como o volume de água utilizado, as fontes de captação, as práticas de reuso e reciclagem, bem como a gestão de efluentes.

A seleção das empresas foi feita por critério de acessibilidade e disponibilidade de dados, privilegiando aquelas que permitiram o acesso às informações necessárias para o cálculo da pegada hídrica e que abranjam uma boa parte do mercado.

Este recorte espacial e setorial buscou garantir a viabilidade da pesquisa e a relevância dos resultados, possibilitando a identificação de padrões e a proposição de práticas sustentáveis aplicáveis não apenas às empresas estudadas, mas potencialmente extensíveis a outras organizações do setor no contexto regional.

3.3 População e Amostra

Para a realização deste estudo, foram coletados dados de quatro empresas produtoras de concreto usinado localizadas nas cidades de Cabedelo, João Pessoa e Campina Grande, no estado da Paraíba, que operam regularmente e possuem processos industriais que envolvem o consumo significativo de água.

Considerando as limitações práticas de acesso e disponibilidade de dados, será utilizada uma amostragem não probabilística, por conveniência, envolvendo as empresas que se dispuserem a participar da pesquisa e fornecer as informações

necessárias para a análise da pegada hídrica. Esse tipo de amostragem é adequado em pesquisas exploratórias, quando o pesquisador busca compreender fenômenos ainda pouco estudados e necessita selecionar unidades que possibilitem o levantamento de dados relevantes (GIL, 2008).

Os critérios de inclusão das empresas consideram:

- Estarem ativamente operando no período da coleta de dados;
- Utilizarem água em seus processos de produção de concreto;
- Consentirem em fornecer dados sobre o volume de produção, consumo de água e práticas de gestão hídrica.

A definição da amostra busca assegurar a representatividade mínima necessária para realizar comparações entre empresas de diferentes práticas operacionais, permitindo identificar padrões de consumo e oportunidades de redução da pegada hídrica no setor.

3.4 Coleta de Dados

A coleta de dados para este estudo foi realizada em duas etapas: a obtenção de dados primários diretamente nas empresas selecionadas e a consulta a dados secundários disponíveis em documentos institucionais e bases públicas.

a) Dados primários

Os dados primários foram obtidos por meio de:

- Aplicação de formulários estruturados junto aos responsáveis técnicos das empresas, contendo questões sobre o consumo de água, volume de produção de concreto, fontes de abastecimento hídrico e práticas de reuso e tratamento de água;

A coleta foi realizada de forma remota com a utilização do Google Forms, respeitando as condições de disponibilidade das empresas.

b) Dados secundários

Serão coletados dados secundários para complementar e validar as informações obtidas:

- Dados técnicos sobre padrões de produção de concreto e consumo hídrico provenientes de estudos científicos e relatórios setoriais.

Para assegurar a fidedignidade e validade dos dados coletados, foram adotados procedimentos padronizados de registro e organização das informações, conforme recomendado na literatura sobre métodos de pesquisa social (GIL, 2008).

A Tabela 3 apresenta os Instrumentos, objetivos, tipos de dados e formas de aplicação utilizados no estudo.

Tabela 3 – Instrumentos de coleta de dados utilizados na pesquisa

Dados	Instrumento	Objetivo	Tipo de Dado	Forma de Aplicação
Primário	Formulário estruturado	Levantar dados sobre consumo de água, produção de concreto e gestão hídrica	Quantitativo e Qualitativo	Google Forms
Secundário	Dados técnicos sobre padrões de produção de concreto e consumo hídrico	Complementar informações	Quantitativo e qualitativo	Pesquisa na Literatura

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 Instrumentos de Análise

A análise dos dados obtidos foi realizada por meio de diferentes instrumentos, combinando abordagens quantitativas e qualitativas, de forma a garantir uma interpretação abrangente dos resultados da pesquisa.

Os dados quantitativos, coletados por meio dos formulários estruturados, foram organizados em planilhas eletrônicas e analisados com base em indicadores comparativos, como o volume de água consumida por metro cúbico de concreto produzido. Esses dados permitiram calcular a pegada hídrica total das empresas

participantes, de acordo com a metodologia proposta por Hoekstra et al. (2011), considerando suas três componentes: azul, verde e cinza.

Já os dados qualitativos, oriundos da Literatura, foram tratados por meio da análise de conteúdo temática.

A comparação entre os dados obtidos por diferentes fontes e métodos foram essenciais para validar os dados obtidos, identificar convergências e compreender divergências. Essa abordagem multifacetada visa aumentar a confiabilidade da pesquisa e oferecer subsídios consistentes para a formulação de recomendações e estratégias de redução da pegada hídrica no setor de concreto usinado.

3.6 Procedimentos para Cálculo da Pegada Hídrica

O cálculo da pegada hídrica das empresas de concreto usinado foi realizado com base na metodologia proposta por Hoekstra et al. (2011), consolidada no Manual de Avaliação da Pegada Hídrica. Essa metodologia permite mensurar o volume total de água utilizada direta e indiretamente em determinado processo ou produto, considerando três componentes principais: azul, verde e cinza.

a. Pegada Hídrica Azul (PH_a)

Refere-se ao volume de água superficial ou subterrânea retirada diretamente de fontes naturais (como poços, rios ou rede pública) para ser utilizada no processo produtivo. O cálculo será feito com base nos dados fornecidos pelas empresas sobre o consumo total de água ao longo do período de análise (em geral, um ano).

A fórmula 1 foi simplificada, já que os dados obtidos são do volume total de água consumida (m^3) onde incorpora a Evaporação da água azul, Incorporação da água azul e a Vazão de retorno perdida, que dividindo pelo volume total de concreto produzido em m^3 é encontrada a Pegada hídrica do concreto usinado.

$$PH_a = \frac{\text{Volume total de água consumida (m}^3\text{)}}{\text{Volume total de concreto produzido (m}^3\text{)}}$$

b. Pegada Hídrica Verde (PH_v)

A pegada hídrica verde está diretamente associada à água de chuva que é absorvida pelo solo, sendo caracteristicamente vinculada aos produtos agrícolas e florestais. Isso ocorre porque depende da umidade do solo proveniente da chuva, que é consumida por evaporação e transpiração pelas plantas. No entanto, ela também pode estar presente em outros processos produtivos que utilizam diretamente a umidade natural do solo. No caso específico da produção de concreto, a umidade presente nos agregados influencia diretamente o fator água/cimento, reduzindo a necessidade de adição de água.

Apesar dessa possibilidade, calcular a pegada hídrica verde no contexto das empresas de concreto usinado apresenta grande complexidade e enfrenta a escassez de dados precisos que permitam sua mensuração adequada. Devido à dificuldade em obter medições da umidade natural dos agregados e pela ausência de registros sistemáticos desse fator nas empresas analisadas, optou-se por considerar a pegada hídrica verde como **nula**.

c) Pegada Hídrica Cinza (PH_c)

Corresponde ao volume de água necessário para diluir os poluentes gerados, até que a água residual atinja padrões aceitáveis de qualidade, no entanto, para o cálculo dessa componente, seriam necessários dados detalhados sobre a carga poluidora dos efluentes gerados no processo produtivo, o que não está disponível ou registrado de maneira adequada nas empresas pesquisadas. Dessa forma, a ausência de informações confiáveis impossibilita o cálculo da pegada hídrica cinza, que também será considerada **nula** nesta pesquisa.

d) Pegada Hídrica Total

A pegada hídrica total por unidade de produção é a soma das componentes azul, verde e cinza, obtida para cada empresa:

$$PH_{total} = PH_a + PH_v + PH_c$$

Os resultados foram expressos em m³ de água por m³ de concreto produzido, permitindo a comparação entre empresas e a identificação de oportunidades para reduzir o impacto hídrico da produção.

3.7 Técnicas de Comparação e Avaliação

Após o cálculo da pegada hídrica total para cada empresa participante, foram adotadas técnicas de comparação entre os casos analisados, com o objetivo de identificar padrões, discrepâncias e boas práticas associadas ao uso da água na produção de concreto usinado.

a) Análise comparativa

Os valores da pegada hídrica total ($PH_a + PH_v + PH_c$) foram normalizados por unidade de produção, ou seja, expressos em m³ de água por m³ de concreto produzido. Essa padronização permitiu a comparação direta entre empresas, independentemente do seu porte ou volume total de produção.

Serão observados:

- Diferenças no consumo de água entre empresas com características produtivas semelhantes;
- Impacto de práticas de reuso ou tecnologias de economia na redução da pegada hídrica;
- Fontes de abastecimento predominantes (rede pública, poço, reuso) e sua influência no indicador final.

b) Análise qualitativa

Os dados obtidos por meio da pesquisa literária foram interpretados e comparados com os dados obtidos nos questionários:

- Gestão hídrica interna;
- Consumo hídrico;
- Barreiras enfrentadas;
- Iniciativas e tecnologias adotadas;

Essa análise qualitativa complementou a análise quantitativa, ajudando a explicar por que determinadas empresas apresentam maior ou menor pegada hídrica, com base em suas estratégias operacionais.

c) Integração e discussão dos resultados

Os resultados obtidos foram integrados em uma discussão crítica, buscando responder aos objetivos da pesquisa, relacionar os dados encontrados à literatura revisada e propor recomendações práticas para a redução da pegada hídrica no setor.

3.8 Avaliar Estratégias de Redução

Como etapa complementar da análise, esta pesquisa buscou avaliar estratégias de redução da pegada hídrica já adotadas pelas empresas participantes ou identificadas durante a revisão da literatura.

Essa avaliação envolveu a identificação, descrição e análise de boas práticas operacionais, tecnologias, sistemas de reuso, rotinas de manutenção e processos internos que contribuam para a redução do consumo de água e da geração de efluentes. Tais estratégias foram analisadas quanto à sua efetividade, viabilidade técnica e econômica, e potencial de replicabilidade em outras empresas do setor.

A partir dessas análises, será possível elaborar recomendações direcionadas ao setor de concreto usinado, com base em casos reais, visando fomentar a sustentabilidade hídrica e a eficiência no uso dos recursos naturais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos a partir da aplicação dos instrumentos de coleta de dados nas empresas de concreto usinado participantes da pesquisa. Os dados foram organizados com base nos três eixos principais do estudo: o cálculo da pegada hídrica total, a análise comparativa entre as empresas e a avaliação de estratégias de redução do consumo de água.

Inicialmente, são apresentados os resultados quantitativos obtidos por meio dos formulários estruturados (Apêndice A), que permitiram calcular a pegada hídrica, conforme a metodologia do Manual de Avaliação da Pegada Hídrica (Hoekstra et al., 2011). Em seguida, os dados qualitativos provenientes das entrevistas semiestruturadas e da análise documental são discutidos, destacando-se as práticas de gestão hídrica, os desafios enfrentados e as iniciativas adotadas pelas empresas.

A discussão dos resultados é estruturada de forma a atender aos objetivos específicos da pesquisa, permitindo identificar padrões de consumo, relacionar o desempenho hídrico com o perfil das empresas e propor estratégias sustentáveis baseadas em evidências reais.

4.1 Caracterização das Empresas Participantes

A TABELA 4 apresenta o resumo das principais características das empresas estudadas, incluindo localização, fonte principal de abastecimento hídrico, produção anual de concreto e a existência de práticas de reúso de água.

Tabela 4 – Caracterização das empresas participantes

Empresa	Localização	Fonte principal de água	Produção 2024 (m³ de concreto)	Porte	Práticas de reúso
Empresa A	Cabedelo	Poço artesiano	Não Informado	-	Sim
Empresa B	Cabedelo	Rede pública + Poço artesiano	54.000	Grande	Sim

Empresa C	Campina Grande	Rede pública + Poço artesiano	17.800	Médio	Sim
Empresa D	João Pessoa	Poço artesiano	6.680	Médio	Não

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Observa-se que a maior parte das empresas utiliza como principal fonte de abastecimento a água proveniente de poços artesianos, sendo, em alguns casos, complementada por fornecimento da rede pública. Apenas uma empresa deixou de informar sua produção anual, enquanto as demais apresentaram volumes que variam entre 6.680 m³/ano (Empresa D) e 54.000 m³/ano (Empresa B), permitindo classificá-las, conforme a literatura do setor (OLIVEIRA, 2020), como unidades de médio e grande porte.

Critério por capacidade de produção mensal (mais usado no setor):

Estudos acadêmicos e técnicos classificam o porte das usinas de concreto pelo volume médio mensal produzido:

- **Pequeno porte** → até 500 m³/mês
- **Médio porte** → entre 500 e 1.500 m³/mês
- **Grande porte** → acima de 1.500 m³/mês

4.2 Quantificação da Pegada Hídrica Total

A pegada hídrica azul foi calculada considerando o volume total de água extraído anualmente das fontes (poços artesianos e rede pública), independentemente de parte desse volume ter sido reaproveitado internamente, uma vez que o impacto ambiental está associado à retirada de água na bacia hidrográfica e não apenas ao volume efetivamente consumido. A TABELA 5 apresenta os resultados consolidados:

Tabela 5 – Pegada hídrica azul por empresa

Empresa	Consumo total de água (m³/ano)	Produção anual (m³ de concreto)	Pegada hídrica azul (m³ água/m³ concreto)
Empresa B	7.000	54.000	0,13
Empresa C	3.320	17.800	0,19
Empresa D	2.996	6.680	0,45

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Os resultados demonstram que a Empresa B apresenta a menor pegada hídrica azul entre as analisadas, com 0,13 m³ de água por m³ de concreto produzido, refletindo ganhos de escala em sua operação. Já a Empresa D apresenta o maior valor, com 0,45 m³/m³, resultado que pode estar associado à ausência de práticas de reúso e à menor eficiência produtiva.

A Empresa C, apesar de apresentar alguma prática de reaproveitamento, ainda registra um valor intermediário (0,19 m³/m³), mostrando que o volume total retirado da bacia permanece elevado em relação à produção anual. Esses dados evidenciam que a simples adoção de reúso interno não é suficiente para reduzir a pegada hídrica azul se não for acompanhada por estratégias de redução de captação e melhorias na eficiência global do processo produtivo.

Como reforçado por Hoekstra et al. (2011), a pegada hídrica azul funciona como um indicador comparativo que permite identificar não apenas os volumes absolutos consumidos, mas também a eficiência hídrica relativa de diferentes operações produtivas. Essa análise será aprofundada nos tópicos seguintes, articulando os resultados quantitativos com as práticas de gestão hídrica declaradas pelas empresas.

Vale destacar que, neste estudo, a pegada hídrica azul foi adotada como representativa da pegada hídrica total, devido à indisponibilidade de dados precisos fornecidos pelas empresas sobre os volumes relacionados à umidade natural dos agregados e à quantidade de água que retorna efetivamente ao meio ambiente após

o uso. Como os responsáveis técnicos das usinas não mantinham registros detalhados desses parâmetros no momento da mistura, tornou-se inviável calcular a pegada hídrica verde (relacionada à água presente nos agregados incorporada no processo) e a pegada hídrica cinza (relacionada ao volume necessário para diluir poluentes). Assim, para efeito deste trabalho, essas componentes foram consideradas nulas, permitindo concentrar a análise exclusivamente sobre a parcela azul, alinhada aos dados disponíveis e mantendo a coerência metodológica proposta por Hoekstra et al. (2011).

4.3 Análise das Práticas de Gestão Hídrica

A análise das práticas de gestão hídrica nas empresas (Empresa A), (Empresa B), (Empresa C) e (Empresa D) permitiu identificar diferentes níveis de maturidade e estratégias adotadas para lidar com o consumo de água nas operações. A coleta de dados, realizada por meio do questionário estruturado, revelou tanto aspectos quantitativos quanto qualitativos que impactam diretamente a eficiência hídrica e a pegada hídrica azul calculada anteriormente.

A empresa (A) e a empresa (B), ambas localizadas em Cabedelo, destacaram-se por possuir ações específicas voltadas à gestão do consumo, incluindo monitoramento mensal do volume de água captado, uso de aditivos e implementação parcial de sistemas de reúso da água proveniente da lavagem de caminhões betoneira. Essas iniciativas refletem diretamente nos indicadores de eficiência hídrica, posicionando-as entre as empresas com menores valores de pegada hídrica azul por metro cúbico de concreto produzido.

Já a empresa (C), situada em Campina Grande, embora apresente práticas de reúso parcial e o uso de aditivos para reduzir a demanda de água no amassamento, relatou a ausência de controle detalhado da umidade dos agregados e a falta de medição setorial do consumo hídrico. Esse cenário aponta para oportunidades de melhoria, especialmente no que diz respeito à automação de processos e ao uso de sensores para ajustar com precisão a dosagem de água no processo produtivo.

A situação mais crítica foi observada na empresa (D), de João Pessoa, que declarou não adotar práticas formais de reúso, não possuir sistemas de decantação para tratamento de água residual e não realizar monitoramento regular do consumo. Esse conjunto de fatores resultou no maior valor de pegada hídrica azul entre as

empresas analisadas ($0,45 \text{ m}^3 \text{ água/m}^3 \text{ concreto}$), evidenciando a necessidade urgente de intervenções voltadas à eficiência hídrica.

Entre os desafios apontados pelas empresas, destacaram-se fatores internos, como a ausência de recursos financeiros para investimentos em tecnologias avançadas (ex.: sensores de umidade, sistemas automatizados de medição) e externos, como a falta de políticas públicas e incentivos governamentais específicos para o setor. Esse contexto reforça a importância de programas de capacitação técnica, linhas de crédito direcionadas e maior disseminação de casos de sucesso para estimular a adoção de práticas mais sustentáveis.

Apesar das limitações relatadas, algumas empresas já reconhecem benefícios associados à redução do consumo de água, como economia financeira (redução de custos com captação e tarifas) e benefícios ambientais (menor pressão sobre fontes hídricas locais). Esses resultados indicam que, mesmo em contextos desafiadores, a adoção progressiva de medidas de reúso, automação e captação alternativa podem gerar impactos positivos, servindo como exemplo para outras usinas do setor.

4.4 Comparação com Estudos Anteriores

A análise dos resultados obtidos nas empresas participantes foi comparada com de estudos anteriores relevantes, permitindo identificar padrões, avanços e desafios compartilhados no setor de concreto usinado quanto à gestão hídrica.

Oliveira (2020), em seu estudo sobre consumo de água em usinas de concreto no Rio Grande do Sul, identificou que a usina com a melhor eficiência obteve no valor de $0,14 \text{ m}^3 \text{ de água} / \text{m}^3 \text{ de concreto produzido}$, valor compatível com a empresa B. Contudo, o mesmo autor destaca que o volume total captado por metro cúbico de concreto tende a ser superior quando não há práticas consolidadas de reúso e controle, podendo ultrapassar $0,40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ — valor semelhante ao observado na empresa (D), que apresentou a maior pegada hídrica azul entre as empresas paraibanas analisadas ($0,45 \text{ m}^3/\text{m}^3$).

Já Barreto (2015), ao estudar a água real e virtual no concreto usinado na região Norte, ressaltou a importância de monitorar a umidade dos agregados para evitar dosagens excessivas de água no processo produtivo. Nas empresas analisadas neste estudo, constatou-se que nenhuma das quatro realiza monitoramento preciso

da umidade, reforçando que essa prática continua sendo um gargalo técnico em diferentes regiões do país, independentemente do porte ou localização da empresa.

Souza Júnior (2011), ao investigar a viabilidade da captação de água da chuva para uso na fabricação de concreto em Santa Catarina, evidenciou que, quando bem dimensionada, essa alternativa pode substituir até 90% do consumo anual de água potável nas usinas. Contudo, entre as empresas analisadas no presente estudo, nenhuma relatou adotar captação pluvial de forma estruturada, indicando que essa prática ainda não foi incorporada de forma significativa no setor paraibano, apesar do seu potencial.

Em termos de reúso interno, os resultados obtidos neste trabalho estão alinhados com as tendências nacionais: as empresas que praticam reúso conseguiram reduzir sua captação total anual cerca de um terço, evidenciando benefícios diretos tanto no aspecto econômico quanto ambiental. Contudo, assim como apontado por Paula e Fernandes (2015), a simples existência de sistemas de decantação não garante a eficiência máxima, sendo necessário investir em tecnologias complementares para tratar adequadamente a água residual e expandir sua aplicação nos processos produtivos.

Portanto, ao comparar os resultados obtidos neste estudo com a literatura técnica disponível, observa-se que as empresas paraibanas analisadas apresentam avanços em alguns aspectos, como reúso parcial e uso de aditivos plastificantes, mas ainda enfrentam desafios semelhantes aos de outras regiões do país, especialmente no que se refere à adoção de tecnologias de monitoramento, automação e diversificação das fontes hídricas.

4.5 Discussão sobre Oportunidades de Redução

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que, embora algumas das empresas analisadas já apresentem avanços relevantes no reúso parcial da água (como no caso da empresa B, que conseguiu reduzir cerca de 33% de suas captações totais), ainda existem múltiplas oportunidades de melhoria para ampliar a eficiência hídrica e reduzir a pegada hídrica azul nas usinas de concreto da Paraíba.

Entre as principais oportunidades identificadas, destaca-se a implantação de sensores de umidade nos agregados, uma vez que nenhuma das empresas participantes realiza atualmente esse controle de forma precisa. Conforme apontado

por Barreto (2015), a ausência dessa medição leva a dosagens imprecisas, resultando em uso excessivo de água no amassamento, uma prática que poderia ser corrigida com tecnologia acessível, gerando economia operacional e ganhos ambientais.

Outra oportunidade relevante é a expansão dos sistemas de reúso interno. Apesar das Empresas A, B e C já realizarem reúso parcial da água proveniente das lavagens, a abrangência desse reaproveitamento ainda é limitada, especialmente no caso da empresa C, que reaproveita apenas cerca de 13% do volume total consumido. Investir em sistemas mais robustos de decantação, filtração e tratamento poderia aumentar significativamente a proporção de água reciclada internamente, reduzindo a pressão sobre as fontes primárias de abastecimento.

Além disso, destaca-se o potencial ainda não explorado da captação de águas pluviais. Como demonstrado por Júnior (2011), sistemas bem dimensionados podem substituir até 90% do consumo anual de água potável em usinas de concreto. Nenhuma das empresas analisadas no presente estudo relatou adotar essa prática de forma estruturada, revelando um espaço estratégico para investimentos futuros.

Por fim, é essencial ressaltar a importância de implementar indicadores internos e metas de consumo hídrico, uma prática ainda ausente nas quatro empresas analisadas. O estabelecimento de metas claras, associado ao monitoramento contínuo, não apenas permite identificar pontos críticos de desperdício, mas também reforça a cultura organizacional voltada à sustentabilidade e à melhoria contínua.

Assim, considerando as práticas atuais e os desafios identificados neste estudo, as oportunidades de redução da pegada hídrica no setor de concreto usinado passam pela combinação de tecnologias acessíveis, mudanças operacionais e investimentos estratégicos, alinhados às recomendações das normas técnicas vigentes e às tendências nacionais e internacionais de gestão sustentável da água.

Além dos benefícios ambientais, essas ações também apresentam retorno financeiro mensurável no presente estudo a empresa B diminuiu 33% da captação de água por meio do reúso da água das lavagens dos equipamentos. Estudos como o de Souza (2014) indicam que o reúso de água pode reduzir em até 40% os custos com captação e tratamento nas usinas de concreto, especialmente em regiões onde a extração subterrânea exige maior infraestrutura. A adoção de tecnologias simples, como sistemas de captação de águas pluviais ou decantadores mais eficientes, pode gerar economias significativas a médio prazo, aumentando a competitividade das empresas ao mesmo tempo em que reduzem seu impacto ambiental.

5 CONCLUSÃO

A crescente escassez de água e a necessidade urgente de práticas mais sustentáveis na indústria da construção civil tornam essencial a adoção de ferramentas que permitam mensurar e reduzir os impactos ambientais das atividades produtivas. Nesse cenário, a pegada hídrica surge como um indicador estratégico para compreender o consumo real de água ao longo dos processos industriais, especialmente em setores como o de concreto usinado, cuja demanda hídrica é expressiva.

Diante dessa relevância, o presente trabalho teve como objetivo geral analisar a pegada hídrica total de empresas produtoras de concreto usinado em cidades do estado da Paraíba, buscando identificar práticas e estratégias que possam reduzir o consumo de água sem comprometer a qualidade e a eficiência das operações. Para tanto, foram aplicados questionários, levantados dados quantitativos e qualitativos, e calculados indicadores baseados na metodologia de Hoekstra et al. (2011), priorizando neste estudo a pegada hídrica azul devido à indisponibilidade de dados sobre as componentes verde e cinza.

Os resultados obtidos evidenciaram que as empresas analisadas apresentam perfis distintos quanto ao consumo hídrico, variando entre 0,13 e 0,45 m³ de água por metro cúbico de concreto produzido. Esse intervalo reflete não apenas diferenças na escala produtiva, mas principalmente nas práticas adotadas de gestão hídrica. Destacam-se positivamente as empresas que implementam reúso parcial da água de lavagem, como a empresa B, que conseguiu reduzir em cerca de 33% suas captações anuais totais. Por outro lado, observou-se que nenhuma das empresas realiza controle preciso da umidade dos agregados ou adota captação sistemática de água da chuva, evidenciando lacunas significativas na gestão eficiente do recurso.

Os desafios identificados incluem tanto fatores internos, como ausência de tecnologias e de indicadores de controle, quanto fatores externos, como limitações financeiras e a falta de incentivos específicos para práticas sustentáveis no setor. Apesar disso, foram observados benefícios econômicos e ambientais nas empresas que já adotam medidas de reúso e otimização de traços, reforçando que investir em eficiência hídrica não é apenas uma exigência ambiental, mas também uma estratégia de competitividade.

Como oportunidades futuras, recomenda-se a ampliação dos sistemas de reúso interno (Utilizar água reciclada no amassamento), a adoção de tecnologias de monitoramento (como sensores de umidade e softwares de gestão), a implantação de sistemas de captação pluvial e a definição de metas internas de consumo.

Além disso, sugere-se que trabalhos futuros explorem a quantificação completa das componentes verde e cinza da pegada hídrica, bem como a aplicação de análises econômicas mais detalhadas para avaliar o retorno financeiro das práticas de redução implementadas.

Em síntese, este estudo contribui para a compreensão do panorama hídrico do setor de concreto usinado na Paraíba e reforça a importância de alinhar produção e sustentabilidade, mostrando que a gestão eficiente da água é um pilar essencial para o futuro das empresas e do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 7212: Execução de concreto dosado em central – Procedimento**. Brasília, 2012. Disponível em: <https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/materia/I/NBR%207212%20-%2012_aula_sitepuc.pdf>. Acesso em: 15 maio 2025.
- ANA. **Atlas Águas: abastecimento urbano 2021**. Brasília, DF: ANA, 2021. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/08/ANA-ATLAS-Aguas-AbastecimentoUrbano2021-compressed.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2025.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2013**. Brasília: ANA, 2013. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/436>>. Acesso em: 3 abr. 2025.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: informe anual**. Brasília, DF: ANA, 2021. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf>. Acesso em: 02 maio 2025.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2023**. Brasília: ANA, 2023. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjunturainforme2023.pdf>>. Acesso em: 3 abr. 2025.
- ANA. **Manual de usos consuntivos da água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <<https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2020/02/Manual-Usos-Consuntivos.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2025.
- BARRETO, L. P. G. L. **O estudo da água real e virtual no concreto usinado**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/7925/1/Dissertacao_EstudoAguaReal.pdf>. Acesso em: 15 maio 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- BRITO, LT de L.; SILVA, A. de S.; PORTO, Everaldo R. **Disponibilidade de água e a gestão dos recursos hídricos**. 2007. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/159648/1/OPB1514.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- CBCS. **Posicionamento: Materiais componentes – impactos e desempenho ambiental na construção civil**. São Paulo: CBCS, 2021. Disponível

em: <https://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/posicionamentos/CBCS_CTMat_eriais_Posicionamento_Materiais%20componentes.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2024.

CBHSF. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: 2016–2025. Belo Horizonte: CBHSF, 2016. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixe vivo.org.br/media/2019/08/Plano-de-Recursos-Hidricos_fev-2018.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2025.

CAVALCANTE, J. M. S. Análise Da Pegada Hídrica De Uma Construção Residencial Na Cidade De Crateús - Ce. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/80081/1/2025_tcc_jmscavalcante.pdf>. Acesso em: 25 abril 2025.

GIL, Antônio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. Disponível em: <<https://ayanrafael.com/wp-content/uploads/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9cnicas-de-pesquisa-social.pdf>>. Acesso em: 8 mar. 2025.

GÜNTHER, Hartmut. Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa: esta é a questão?. **Psicologia: teoria e pesquisa**, v. 22, p. 201-209, 2006. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ptp/a/HMpC4d5cbXsdt6RqbrmZk3J/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 8 mar. 2025.

HOEKSTRA, A. Y. et al. Manual de Avaliação da Pegada Hídrica: estabelecendo o padrão global. Water Footprint Network, 2011. Disponível em: <https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_Portuguese.pdf>. Acesso em: 9 maio 2025.

ITB. Acesso à água nas regiões Norte e Nordeste do Brasil: desafios e perspectivas. São Paulo, 2018. Disponível em: <https://bkp-trata.aideia.com/tratabrasil.org.br/images/estudos/acesso-agua/tratabrasil_relatorio_v3_A.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2025.

IAT. Relatório de conjuntura dos recursos hídricos do Estado do Paraná: dados de 2019. Curitiba: IAT, 2020. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/relatorio_conjuntura_recursos_hidricos_2020.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2025.

ITB. Estudo De Perdas De Água Do Instituto Trata Brasil De 2022: Desafios Para Disponibilidade Hídrica E Avanço Da Eficiência Do Saneamento Básico No Brasil. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/09/Relatorio_Completo.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LIMA, R. A. P. A contabilidade aplicada à gestão de recursos hídricos: estudo de caso em empresas de concreto. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Contábeis) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/15820/RODOLFO%20LIMA%20R.A.P.%20A%20CONTABILIDADE%20APLICADA%20A%20GESTAO%20DE%20RECURSOS%20HIDRICOS%20ESTUDO%20DE%20CASO%20EM%20EMPRESAS%20DE%20CONCRETO.pdf>>.

20ALVES%20PAMPLONA%20DE%20LIMA%20-%20TCC%20C.%20CONT%20c3%81BEIS%202016.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 25 abril 2025.

OLIVEIRA, A. M. C. P. **Consumo de água na produção de concreto usinado: quantificação e principais fatores de influência**. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

Disponível em:

<https://repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/9493/Ana%20Martha%20Carneiro%20Pires%20de%20Oliveira_.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 maio 2025.

PAULA, H. M; FERNANDES, C. E. **Gestão da água em usina de concreto: análise do risco das atividades e monitoramento da qualidade da água residuária para fins de reúso**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiânia, v. 10, n. 1, p. 14–25, 2015. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/reec/article/view/32759/18767>>. Acesso em: 15 maio 2025.

PBMC. **Sumário executivo: Base Científica das Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro: PBMC, 2013. Disponível em:

<<https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4306>>. Acesso em: 02 maio 2025.

PEREIRA, E. C. **Avaliação do uso e consumo de água na construção civil**. 2019. Disponível em:

<<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6172/1/consumoaguaconstrucaocivil.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2024.

SNIS. **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2022**. Brasília: Ministério das Cidades, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SOUZA JÚNIOR, E. A. **Viabilidade técnica e econômica da captação da água da chuva para a utilização na fabricação do concreto usinado**. Criciúma:

Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Disponível em:

<<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/1272/1/Edson%20Alano%20de%20Souza%20J%20c3%banior.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2025.

SOUZA, J. L. **Pegada hídrica na produção de concreto: uma abordagem para o semiárido**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014. Disponível em:

<https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/15082/1/2014_tese_jsouza.pdf>. Acesso em: 24 abril 2025.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021: O Valor Da Água**. Paris: UNESCO, 2021. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por>. Acesso em: 22 mai. 2024.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2020: água e mudanças climáticas**. Paris, 2020. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372882_por>. Acesso em: 02 maio 2025.

UNESCO. **Water for People, Water for Life: The United Nations World Water Development Report**. 1. ed. Paris: UNESCO; Berghahn Books, 2003. Atualizado em 2004. Disponível em: <<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129726>>. Acesso em: 14 fev. 2025.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2024: Parcerias e Cooperação para a Água**. Paris: UNESCO, 2023. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388950_por>. Acesso em: 31 maio 2025.

WRI. **Aqueduct: Atlas de Risco Hídrico**. Washington, DC: WRI, 2025. Disponível em: <<https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/>>. Acesso em: 14 fev. 2025.

APÊNDICE A – FORMULÁRIO DE COLETA DE DADOS**Consumo de Água e Práticas de Gestão em Empresas de Concreto Usinado.**

Este questionário faz parte de uma pesquisa de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) com o tema "Análise da Pegada Hídrica Total em Empresas de Concreto Usinado em Cidades na Paraíba". O objetivo do estudo é compreender como as empresas do setor têm gerido o consumo de água, identificar práticas de sustentabilidade hídrica e propor melhorias para a eficiência operacional. Agradecemos sua participação no estudo, garantimos que todas as informações fornecidas serão tratadas com confidencialidade e utilizadas exclusivamente para fins acadêmicos.

Informações Gerais da Empresa

1. **Nome da empresa**

2. **E-mail**

3. **Cidade ***

4. **Quais os produtos fornecido pela a empresa? (Exemplos: Apenas concreto usinado, concreto usinado e pré-moldados de concreto...)**

Produção concreto

5. **São utilizados aditivos nos traços de concreto? Se a resposta for sim, quais são os aditivos e suas funções? (Ex: Aditivos retardadores, aditivos redutores de água, como os aditivos plastificantes)**

6. Qual foi a produção de concreto usinado em m³ no **Ano de 2024**? *

Consumo de Água

7. Quais fontes de abastecimento de água utilizadas (pode marcar mais de uma): *Marque todas que se aplicam.*

- Rede pública
 Poço artesiano
 Captação de água da chuva
 Reuso interno de água (ex: Água de lavagem reutilizada)
 Outro: _____

8. Quais foram as fontes e o consumo total em m³ de água na produção de concreto no ano de 2024? (Ex de resposta: 1000m³ de água retirada de poço artesiano e 2500m³ de água da rede pública foram utilizadas para a produção de concreto)

9. Principais processos que consomem água na empresa (pode marcar mais de um):

Marque todas que se aplicam.

- Mistura do concreto
 Lavagem de caminhões betoneiras
 Lavagem de equipamento
 Outro: _____

10. Qual é a média mensal de geração de águas residuais ou poluídas que requerem tratamento antes de serem descartadas. Caso não tenha registro, responda 'SR'.

Práticas de Gestão da Água

11. A empresa tem alguma ação específica para gerenciar o consumo de água? Se sim, quais são essas ações? (Ex: *monitoramento mensal do consumo de água por setor*)

12. Quais são os maiores desafios enfrentados para reduzir o consumo de água na operação da empresa? Existem fatores externos (ex.: custos, acesso à tecnologia, legislação) que dificultam a adoção de práticas mais sustentáveis?

13. A empresa já adotou ou tem interesse em adotar tecnologias que ajudem na redução do consumo de água?

Práticas de Reutilização e Reciclagem de Água

14. A empresa adota práticas de reutilização de água em seu processo produtivo? Se sim, quais?

15. Existe algum sistema de tratamento de águas residuais para reutilização na produção de concreto?

Sim Não

Resultados e Desafios

16. O que poderia ser feito para incentivar mais empresas do setor a adotarem práticas de redução do consumo/desperdícios de água?

17. Pode citar alguma prática de sucesso que sua empresa utiliza e que poderia servir de exemplo para outras?

18. A empresa já observou algum benefício econômico ou ambiental associado à redução do consumo de água? Se sim, descreva os benefícios observados.

Considerações Finais

19. Há alguma outra informação relevante sobre o consumo de água e práticas de gestão que gostaria de compartilhar?
